GRANDES VOÛTES

GRANDES VOÛTES

PAR

Paul SÉJOURNÉ

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES
INGÉNIEUR EN CHEF DU SERVICE DE LA CONSTRUCTION
DE LA COMPAGNIE PARIS-LYON-MÉDITERRANÉE
PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES

TOME III

Ire PARTIE — VOÛTES INARTICULÉES

(SUITE)

LIVRE I. — DESCRIPTION DES PONTS QUI ONT OU AVAIENT DES VOÛTES INARTICULÉES DE 40m ET PLUS DE PORTÉE

(SUITE)

ARCS ASSEZ SURBAISSÉS

ARCS TRÈS SURBAISSÉS

LIVRE II. — CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE SPÉCIAL AUX VOÛTES INARTICULÉES

BOURGES

IMPRIMERIE Vve TARDY-PIGELET ET FILS

15, RUE JOYEUSE, 15

—

1913

AVERTISSEMENT[1]

DIVISIONS DE L'OUVRAGE

CLASSEMENT DES PONTS EN SÉRIES ET DANS CHAQUE SÉRIE PAR DATE

TABLEAUX SYNOPTIQUES — MONOGRAPHIES

SUITE, DANS CHAQUE MONOGRAPHIE,

DE FIGURES, PLANCHES. PHOTOGRAPHIES, RENVOIS, SOURCES.

DÉSIGNATION ABRÉGÉE DES MATÉRIAUX

UNITÉS AUXQUELLES ON RAPPORTE LES QUANTITÉS ET DÉPENSES

1. Divisions de l'ouvrage. — Cet ouvrage est ainsi divisé :

1re Partie : Voûtes inarticulées[2]. — Ce sont les voûtes ordinaires, ainsi qualifiées par opposition aux voûtes articulées.

2e Partie : Voûtes articulées.

3e Partie : Ce que l'expérience enseigne de commun à toutes les voûtes.

Appendice : Pratique des voûtes. — Instructions pour projeter et construire. — Ouvrages courants, Viaducs..... — Répertoires. — Tables numériques.....

Dans les 1re et 2e Parties, sont décrits les ponts qui ont — ou qui avaient — des voûtes de 40m et plus de portée.

2. Classement des Ponts en séries. — J'ai classé par intrados les voûtes inarticulées, par type d'articulation les voûtes articulées.

Ce classement sera détaillé et justifié plus loin.

3. Classement dans chaque série par date d'exécution. — Dans chaque série, les ouvrages sont classés par date. On voit ainsi ce qui, dans un pont, est emprunté à un plus ancien.

4. Tableaux synoptiques. — Monographies. — Les dispositions comparables des ouvrages d'une série sont rapprochées dans des tableaux synoptiques : ainsi groupées, elles instruisent.

1. — déjà donné en tête des Tomes I et II.

2. — On les a quelquefois dites « encastrées » : à proprement parler, elles ne le sont pas.
En histoire naturelle, ce qui n'a pas d'articulation est justement qualifié « inarticulé ».

Viennent ensuite les monographies de chaque ouvrage : on y trouvera ce qui lui est spécial, description, histoire, dessins, photographies.

Pour tous les ponts, on a donné une élévation à la même échelle, 2^{mm}, de l'arche ou des arches de 40^{m} et plus.

Autant qu'on l'a pu, en restant clair, on n'a donné qu'une seule fois chaque indication, soit dans les tableaux synoptiques, soit dans la monographie, soit dans les dessins.

5. Suite, dans chaque monographie, de figures, planches, photographies, renvois, sources. — Chaque ouvrage a sa suite :

de figures : f_1 f_2..... ;

de planches : Pl_1 Pl_2..... ;

de photographies : Φ_1 Φ_2..... ;

de renvois au bas des pages : [1], [2]..... ;

de sources : S_1, S_2.... indiquées à la fin de chaque monographie, quelquefois subdivisées : S'_1, S''_1.....[3].

6. Désignation abrégée des matériaux aux tableaux synoptiques et aux dessins.

Béton				B
Moellons ordinaires	employés en blocage sans préparation spéciale			MO
	choisis (c'est-à-dire avec sujétion)	employés en parement	à joints incertains	MOI
			grossièrement disposés par assises horizontales.	MOH
		employés en voûte	méplats, lités, prolongeant, soit chaque lit de douelle, soit un lit sur 2, sur 3.	MOV
Moellons à face rectangulaire, les 4 arêtes dans un même plan	Moellons équarris[4]	»		ME
		taillés en voussoirs, lits pleins prolongeant exactement ceux de douelle. Joints et face de queue en partie pleins.		MEV
	Moellons d'appareil[5]	Dimensions imposées	»	MA
			taillés en voussoirs, lits et joints pleins.	MAV
Libages	Pierre de taille de grand appareil grossièrement équarrie.			L
Pierre de taille	Blocs appareillés sur les 6 faces. Toutes les dimensions imposées.			PT
Briques				Br

3. — On peut ainsi contrôler et apprécier les renseignements donnés.

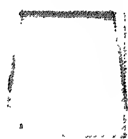
4. — Synonyme : Moellons têtués.

5. — Synonyme : Moellons smillés.

7. Unités adoptées pour comparer les quantités et dépenses.

A. — *Cintres.* — Dans la colonne 14 des Tableaux synoptiques, on a rapporté le cube de bois, le poids de fer et la dépense, au mètre carré de douelle d'une voûte V' à tympans verticaux, exigeant le même cintre.

La largeur uniforme de V' est celle de la voûte considérée :



au joint à 60° de la verticale pour les pleins cintres, les ellipses et les arcs de plus de 120° ;

aux naissances, pour les arcs de moins de 120° ;

c'est-à-dire, pour toutes les voûtes, au joint à partir duquel les voussoirs cessent de pouvoir être soutenus en faisant simplement déborder les couchis.

Comme il convient que les vaux se prolongent jusqu'à l'angle de 75°, on a pris pour surface de douelle celle de la voûte théorique V

à partir des angles de 75° pour les ellipses, pleins cintres, arcs de cercle de plus de 150°,

à partir des naissances pour les arcs de cercle surbaissés de moins de 150°.

B. — *Ouvrage.* — La surface offerte à la circulation, S_1, est le produit

$S_1 =$ (Longueur totale entre les abouts des parapets donnée col. 2) × (Largeur disponible entre parapets donnée col. 3)

S_1 mesure l'utilité de l'ouvrage.

Soit S_2 la surface vue d'élévation entre la voie portée, les murs en aile ou quarts de cône et le terrain naturel.

Je considère le volume $W = S_2 \times$ (Largeur disponible entre parapets).

C'est le volume d'un mur plein ayant même surface d'élévation vue et même largeur utile que l'ouvrage. — Convenons de l'appeler le volume « utile ».

Soient Q et D le cube de maçonnerie de l'ouvrage et sa dépense.

$Q : S_1$ est le cube de maçonnerie à mortier par m. q. de surface horizontale utile. C'est l'épaisseur d'une dalle en maçonnerie de même cube que l'ouvrage et qui aurait même longueur et même largeur utile.

$Q : W$ est le cube de maçonnerie à mortier, par m. c. de volume « utile ».

$D : S_1$ est le prix du m. q. de surface offerte à la circulation.

$D : W$ est le prix du m. c. de volume « utile ».

Toutes ces quantités sont données à la colonne 18 des Tableaux synoptiques.

Quand les fondations sont très au-dessous de la vallée, on a donné de plus les rapports $Q : W'$, $D : W'$.

$W' = (S_2$, surface d'élévation au-dessus des fondations$) \times$ (Largeur disponible entre parapets).

W' est le volume « utile » au-dessus des fondations.

1re PARTIE

VOÛTES INARTICULÉES

(SUITE)

PRÉLIMINAIRES

GROUPEMENT EN SÉRIES DES PONTS À VOÛTES INARTICULÉES

LIVRE I

DESCRIPTION DES PONTS
QUI ONT OU AVAIENT DES VOÛTES INARTICULÉES
DE 40m ET PLUS DE PORTÉE

(SUITE)

LIVRE II

CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE
DE SPÉCIAL AUX VOÛTES INARTICULÉES

PRÉLIMINAIRES[1]

GROUPEMENT EN SÉRIES DES PONTS A VOÛTES INARTICULÉES

SÉRIES PAR INTRADOS — SYMBOLES

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE ET PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

SÉRIES PAR VOIE PORTÉE — PONTS EN DEUX ANNEAUX

PONTS AYANT UNE VOÛTE OU DES VOÛTES DE 40^m OU PLUS DE PORTÉE

EXEMPLES : SENS DE QUELQUES SYMBOLES

1. Groupement en séries des ponts à voûtes inarticulées. — On a rapproché, dans les mêmes séries, les Ponts qui ont les mêmes caractères principaux : intrados, — une seule grande arche ou plusieurs grandes arches, — voie portée.

2. Séries par intrados. — Symboles. — Le caractère dominateur, celui qui classe tout d'abord les voûtes inarticulées, c'est la forme de l'intrados.

Voici le classement adopté :

	Portée 2a	*Montée b*	*Surbaissement* $\sigma = \frac{b}{2a}$	
	Pleins Cintres. — Séries **C**		$\sigma = \frac{1}{2}$	b.a 2a
DEMI-COURBES COMPLÈTES *Tangentes verticales aux naissances*	Courbes surbaissées $\sigma < \frac{1}{2}$		Courbes surhaussées (**h**) $\sigma > \frac{1}{2}$	
	continues	brisées (**O**)	continues	brisées (**O**)
	b.2aσ 2a Séries **E** Ellipses du 2[e] degré - Courbes algébriques à forme d'ellipse - Courbes composées de segments de courbes - Anses de panier à m centres...	b.2aσ 2a Séries **OE** 2 ellipses, 2 anses de panier, 2 paraboles se coupant...	b.2aσ 2a Séries $\mathbf{E_h}$ Ellipses surhaussées - Anses de panier surhaussées...	b.2aσ 2a Sér. $\mathbf{O_hC}$ 2 pleins-cintres se coupant...
ARCS SEGMENTS DE COURBES *Tangentes inclinées aux naissances* Séries **A**	b.2aσ 2a	b.2aσ 2a	b.2aσ 2a Séries $\mathbf{A_h}$ Segments d'ellipses, d'anses de panier surhaussées, de paraboles...	b.2aσ 2a Sér. $\mathbf{O_hA}$
	Arcs pour lesquels $\sigma \geqslant \frac{1}{2\sqrt{3}} = \frac{1}{3{,}464} = 0{,}288$ dits : peu surbaissés			
	Séries $\overset{\frown}{\mathbf{A}}$	Séries $\mathbf{O}\overset{\frown}{\mathbf{A}}$		
	Arcs pour lesquels $\frac{1}{2\sqrt{3}} = 0{,}288 > \sigma > \frac{1}{7} = 0{,}143$ dits : assez surbaissés			
	Séries $\overset{\frown}{\mathbf{A}}$	Séries $\mathbf{O}\overset{\frown}{\mathbf{A}}$		
	Arcs pour lesquels $\sigma \leqslant \frac{1}{7} = 0{,}143$ dits : très surbaissés			
	Séries $\overset{\frown}{\mathbf{A}}$	Séries $\mathbf{O}\overset{\frown}{\mathbf{A}}$		

1. — Les mêmes qu'en tête des Tomes I et II.

3. Ponts à une seule grande arche et ponts à plusieurs grandes arches. — On traite de façon fort différente un ouvrage à une seule grande arche ou à plusieurs grandes arches.

De plus, la surcharge ne déforme pas également une voûte unique retombant sur deux culées et la même voûte buttant contre deux piles.

On a donc distingué les ponts à une seule grande arche : $\mathbf{C}^1$ $\mathbf{E}^1$ $\widehat{\mathbf{A}}^1$ $\widehat{\mathbf{A}}^1$ $\widehat{\mathbf{A}}^1$... et les ponts à plusieurs : $\mathbf{C}^n$, $\mathbf{E}^n$, $\widehat{\mathbf{A}}^n$, $\widehat{\mathbf{A}}^n$, $\widehat{\mathbf{A}}^n$,....

4. Séries par voie portée. — Le travail des voûtes, par conséquent leur épaisseur, dépend de ce qui passe dessus.

On distinguera donc :

les Ponts-route : $\mathbf{C}\,r^{te}$, $\mathbf{E}\,r^{te}$, $\mathbf{A}\,r^{te}$,....

les Ponts sous chemin de fer à voie normale : $\mathbf{C}\,F^r$, $\mathbf{E}\,F^r$, $\mathbf{A}\,F^r$,....

les Ponts sous chemin de fer à voie étroite : $\mathbf{C}\,f^r$, $\mathbf{E}\,f^r$, $\mathbf{A}\,f^r$,....

les Ponts-aqueducs : $\mathbf{C}$ aq, $\mathbf{E}$ aq,....

....

5. Ponts en deux anneaux. — Par économie, on a récemment, pour de larges ponts de ville, porté la chaussée sur deux minces anneaux, un à chaque tête.

Les voûtes seront désignées comme précédemment, mais en doublant la lettre de l'intrados, par exemple : $\widehat{\mathbf{A}}^1\,\widehat{\mathbf{A}}^1\,r^{te}$....

6. Ponts ayant une voûte ou des voûtes de 40^m ou plus de portée. — Les symboles seront suivis de l'indication : $\geqslant 40^m$.

7. Exemples : Sens de quelques symboles.

$$\widehat{\mathbf{A}}^1\,f^r\,(\geqslant 40^m)3$$

désigne un ouvrage en arc ($\mathbf{A}$) à une seule grande arche ($\mathbf{A}^1$) ; — assez surbaissé, c'est-à-dire de surbaissement compris entre $\frac{1}{2\sqrt{3}}$ et $\frac{1}{7}$ ($\widehat{\mathbf{A}}$) ; — inarticulé (pas de signe d'articulation sous $\mathbf{A}$) ; — sous voie étroite (f^r) ; — de portée de 40^m ou plus ($\geqslant 40^m$) ; — le 3e, par ordre chronologique, de la série $\widehat{\mathbf{A}}^1\,f^r\,(\geqslant 40^m)$.

$$\mathbf{E}^n\,F^r\,(\geqslant 40^m)2$$

désigne un pont en ellipse ($\mathbf{E}$) à plusieurs grandes arches ($\mathbf{E}^n$) ; — inarticulé (pas de signe d'articulation sous $\mathbf{E}$) ; — sous chemin de fer à voie normale (F^r) ; — de portée de 40^m ou plus ($\geqslant 40^m$) ; — le 2e, par date, de la série $\mathbf{E}^n\,F^r\,(\geqslant 40^m)$.

$$\widehat{\mathbf{A}}^1\,\widehat{\mathbf{A}}^1\,r^{te}\,(\geqslant 40^m)2$$

désigne un pont à deux anneaux en arc ($\mathbf{A}\,\mathbf{A}$), chacun à une seule grande arche ($\mathbf{A}^1\,\mathbf{A}^1$), de surbaissement $\sigma \geqslant \frac{1}{2\sqrt{3}}$ ($\widehat{\mathbf{A}}^1\,\widehat{\mathbf{A}}^1$) ; — inarticulé (pas de signe d'articulation sous $\mathbf{A}\,\mathbf{A}$; — sous route (r^{te}) ; — de portée de 40^m ou plus ($\geqslant 40^m$) ; — le 2e, par date, de la série $\widehat{\mathbf{A}}^1\,\widehat{\mathbf{A}}^1\,r^{te}\,(\geqslant 40^m)$.

LIVRE I (*Suite*)

DESCRIPTION DES PONTS

QUI ONT OU AVAIENT

DES

VOÛTES INARTICULÉES

DE 40m ET PLUS DE PORTÉE

TABLEAUX SYNOPTIQUES

MONOGRAPHIES

VOÛTES INARTICULEES

EN

ARC ASSEZ SURBAISSÉ



VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS ROUTE

Série Â 1re (40m)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDE VOÛTE					
PONT Date Symbole 1	*Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage 2	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados 3	**INTRADOS** Portée *Montée* Surbaissement *Rayon* 4	**ÉPAISSEURS** CORPS Clef *Retombées* 5	**ÉPAISSEURS** TÊTES Clef *Retombées* 6	**MATÉRIAUX** *Mortier* *Poids, pour 1 mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	**PRESSIONS** en kg 0^m01^2 *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
de *Trezzo* *Italie* 1370-1377 *ruiné en 1416* $\widehat{A}^{1}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})$1		» *9m 10 entre têtes* » »	Arc de cercle **72m,00** *21m 10* $\frac{1}{3,412}$ = 0,293 *41m 25*	**2m,05** *Epaisseur uniforme*		Bandeaux : Grès		1° » 2° *Archivolte*
Pont-y-tu-Pridd *Angleterre* 1749-1750 $\widehat{A}^{1}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})$2	» 250mm 250mm 12m	3m 353 *4m 394* La largeur croît par ressauts de 5c à 7c5 *Largeur entre têtes aux reins : 4m826*	Arc de cercle **42m,672** *10m 668* $\frac{1}{4}$ = 0,25 *26m 67*	0m,457 *Epaisseur uniforme*	0m,762 *Epaisseur uniforme*	Bandeaux : PT[1] Grès dur hauteur uniforme : 0m76 épaisseur : 0m15 à 0m23 queue : 0m30 à 0m45 Douelle : Schiste Petits moellons. hauteur : 0m457 épaisseur : 2 ou 3 moellons pour un voussoir de tête Queutage : MOH[1] *Chaux*		1° 6 voûtes transversales annulaires vues, de 1m, 1m60, 2m60 environ 2° »
de **Chester** *Angleterre* 1833-1834 $\widehat{A}^{1}$ r^{le} $(\geqslant 40^{m})$3	*105m* » 19m	10m,20 *10m 90* Pas de fruit 1m 44	Arc de cercle **60m,959** *12m 801* $\frac{1}{4,76}$ = 0,210 *42m 67*	1m,219 *1m,829*		Aux naissances, 2 assises en PT[1] Granit Bandeaux, Clef et contre-clefs : PT[1] Marbre Douelle et Queutage : Grès (New red sandstone) *Chaux du pays* *0mc5*		1° 2 étages de voûtes longitudinales en ogive : 4 en haut, 2 en bas. 2° *Archivolte*
des **Bains-de-Lucques** *Italie* 1845-1847 1874-1877 $\widehat{A}^{1}$ r^{le} $(\geqslant 40^{m})$4	» » 13m	7m,83 » Pas de fruit »	Arc de cercle **47m,835** *7m 128* $\frac{1}{6,71}$ = 0,149 *43m 69*	1m,80 *3m,00* Extrados à ressauts		Bandeaux : PT[1] Grès (490k à 625k) Corps : Br (130k à 150k) *Chaux maigre en pâte — 0mc666*	Pression moyenne : Clef 16k3 Naissances 11k8 *La courbe de pression passe au 1/3 supérieur de la clef et au milieu des naissances*	1° 4 voûtes transversales cachées en arc 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES — Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D** Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher	Fixe	5 » 0m88						
Rive gauche : *Rocher* Rive droite : *En avant, Rocher* *En arrière, Sable mouvant* *Pilotis*	Fixe *Sapin* Coins sous chaque couchis	6 » »	283mc 12500f	0mc 38 16f 9	1re assise sur coins en plomb. Bandes de plomb de 20c à 23c dans tous les joints, sur les 2/3 de la douelle à partir des retombées.		t'_v 63mm à 67mm	**D = 1 037 500f** (non compris les abords) D : S_p = 968f 7 D : W = 48f 4
Rocher » » »	Retroussé soutenu au milieu *Sapin* *Pièces secondaires : Pin ou peuplier* Caisses à sable Cales	6 *35* 1m 46 *Fermes intermédiaires : 250mm* *Fermes de tête : 220mm*	321mc 2430k 33114f	0mc 80 6k 0 67f 5	2 rouleaux	1er décintrement partiel, avant construction des bandeaux : 3 novembre 2e décintrement partiel : Janvier 3e décintrement partiel : Avril 4e décintrement partiel : Août	t_c = 75mm t'_v = 183mm	Travaux exécutés en 1874-1877 : **Q = 4011mc** **D = 118 542 lires**

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg 0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Claix** *France* 1873-1874 **Â**[1] rte (⩾ 40m)5	*76m* 15mm 15mm 11m20	7m30 *8m10* Pas de fruit »	Arc de cercle **52m,00** *8m05* $\frac{1}{6,46} = 0,155$ *46m*	1m,50 *3m10*	1m,20 *2m60*	Bandeaux : PT[1] Bossages 7 tirants en fer de 55mm × 15mm scellés dans les bandeaux Douelle : MEV[1] Queutage : MOV[1] *Ciment artificiel Vicat n° 1 — 1000k*	Pression moyenne à la clef : 19k *Dupuit*	1° Voûtes cachées en plein cintre de 1m50, sur piles de 0m80 : 3 en long, 14 en travers (Voûtes d'arêtes) 6 tirants entre murs de tête. 2° »
du *Saulnier* *France* 1882 *écroulé en 1912* **Â**[1] rte (⩾ 40m)6	*66m* » 17m	3m80 *3m40* Pas de fruit 0m60	Arc de cercle **43m,00** *8m60* $\frac{1}{5} = 0,20$ *31m17*	1m,30 *2m08*		Bandeaux et Douelle : MAV[1] 22 tirants en fer de 50mm × 15mm entre bandeaux Queutage : MEV[1] Grès calcaire à 300k *Chaux du Teil*	Pression moyenne : Clef : 14k6 Retombées : 14k8 *Dupuit* 2 voitures de 16t	1° En travers, 2 étages de voûtes en plein cintre de 1m50, sur piles de 1m20. En long 1 voûte en plein cintre de 1m, sur murs de 1m20 2° »
d' **Elyria** *États-Unis* 1886 **Â**[1] rte (⩾ 40m)7	*50m29* » »	7m925 *6m096* Pas de fruit 1m219	Arc de cercle **45m,72** *8m23* $\frac{1}{5,55} = 0,18$ *35m81*	1m,143 *1m371*		Voussoirs de toute l'épaisseur de la voûte, taillés sur 5 faces Épaisseur : 45'7 Longueur : 76'2 Découpes d'au moins 40' Grès d'Elyria, à 437k *Ciment Portland 1mc* *joints suivant le rayon : 6mm*	Pression sans surcharge Clef : 19k7 Retombées : 24k1	1° Pas d'évidement Remplissage en pierre cassée et gravier 2° »
de **Wheeling** *États-Unis* 1891-1892 **Â**[1] rte (⩾ 40m)8	*98m91* 42mm5 42mm5 10m50	13m716 *14m528* Pas de fruit »	Arc de cercle **48m,463** *8m635* $\frac{1}{5,612} = 0,178$ *38m22*	1m,371 *1m829*	1m,524 »	Bandeaux : PT[1] à crossettes, de toute l'épaisseur de la voûte	Pression maxima aux retombées : 37k3 » 488k/mq	1° 8 murs longitudinaux de 0m61, espacés de 0m888 et 0m863 2°

1. Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

SÉRIE $\widehat{A}^1$ r^le^ (⩾40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D**
FONDATIONS	GRANDE VOÛTE							
	CINTRE				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses					
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/0m01² *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Calcaire schisteux tendre taillé à redans. » Pression moyenne : 12k1 »	Fixe Poinçons et triangles » Boîtes à sable remplaçant, au dernier moment, des billots	6 *35cm* 1m50 »	» » 32 535f	» » 68f9	2 rouleaux A chaque rouleau, 4 tronçons	» *42 jours* 10 avril	t_c = 4mm t'_v = 1 à 2mm	**D = 139 564f** D : S_p = 251f6 D : W = 26f6
Rive droite : *Rocher Schiste apparent* Rive gauche : *Schiste pourri et argile* Pression maxima : 7k7	Fixe *Pin* Boîtes à sable	3 *20cm* 1m50 »	95mc » »	0mc59 » »	2 rouleaux	» *39 jours* Octobre et novembre	t_c = 0 t'_v = 52mm	**D = 69 000f** D : S_p = 275f1 D : W = 16f6
Rocher solide *Assiette taillée à la main : explosifs interdits*							t'_v = 203mm	
Rocher	Fixe » Boîtes à sable	12 *30cm* 1m346 »						**D = 699 300f** D : S_p = 515f5 D : W = 65f0

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole	PROJET ENSEMBLE Longueur *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDE VOÛTE INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS CORPS Clef *Retombées*	TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1m³ de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg (0m01²) *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMEN DES TYMPAN 2° *DÉCORATIC DES TÊTE*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Bellefield** à **Pittsburg** *États-Unis* 1896-1897 Â[1] rte > 10m,9	*103m94* » 21m34	24m08 *24m993* Pas de fruit »	Arc de cercle 45m,72 *11m176* $\frac{1}{4,10}$ = 0,244 *28m97*	Douelle en PT[1] : 1m,219 *1m829*	1m,219 *1m829*	Têtes, sur 2m13 : PT[1] *Ciment lent 0m³5* Douelle : PT[1] Épaisseur 0m61 *Ciment lent 0m³5* Queutage : Béton Ciment Saylor 1mt Sable 2mt Pierre cassée à 5c 4m5		1° 7 voûtes longitudina en Br[1], en arc, de 2m21 à 2m59, sur murs en MOH de 0m69 Murs transversau en MO[1] de 0m69 2° *Cadres da les tympan*
de **Plauen** *Allemagne* 1903-1905 Â[1] rte > 10m,10	*150m* 1mm2 1mm2 20m	17m00 *16m00* Pas de fruit 1m20	Arc d'anse de panier à 5 centres 90m,00 *18m00* $\frac{1}{5}$ = 0,20 *Rayons :* *Cerveau (sur 30m) 105m* *Reins 58m50* *Retombées 30m10*	1m,50 *2m00* *à 32m50 de la clef*	1m,50 *2m00* *à 32m50 de la clef*	Petits moellons (10 à 12cm d'épaisseur) de schiste dur (1580k) Aux têtes, crépi de 7cm : Ciment 1vol Sable blanc 3vol *Cerveau* *Ciment Stern 1vol* *Sable 3vol* *Reins et Culées* *Ciment Vorwohler 1vol* *Gros sable 1vol*	Pression maxima Clef [illegible] A 32m50 de la clef [illegible] Retombées [illegible] *Courbe des pressions construite [illegible] points [illegible] arbitrairement [illegible]* Pression [illegible] Tension [illegible] *Arc élastique* [illegible] 3 tombereaux [illegible]	1° 6 voûtes longitudinal de 1m50 entre 2 de 1m80, sur piles de 0m40. Aux reins 6 voûtes transversal annulaires vues, de 5m. 2° »
de **Guggersbach** *Suisse* 1906 Â[1] rte > 10m,11	*67m10* 13mm 13mm 12m	5m00 *3m90* Pas de fruit 0m60	Arc de cercle 50m,20 *8m22* $\frac{1}{6,10}$ = 0,164 *42m431*	1m,10 *1m60*	1m,10 *1m60*	Béton 250k de ciment par mètre cube de béton (aux culées, 180k)	Pressions minima et maxima [illegible] Clef [illegible] [illegible] Reins [illegible] Retombées [illegible] *Arc élastique* 250k [illegible] Voitures de 12t	1° Plateforme en béton arm sur piles de 0m60 aux têtes, espacées de 3m80. 2° »

1. Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

SÉRIE Â¹ r^te (⩾ 40^m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE À MORTIER **Q** — DÉPENSE **D**
FONDATIONS	GRANDE VOÛTE							
	CINTRE				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses					
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/$\overline{0^m01^2}$ *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher solide » » »	Fixe *Sapin noir du Canada* Boîtes à sable en fonte	14 » 1^m88 entre les fermes *51mm*	1062^mc	0^mc82		» » Septembre et octobre	t_c = 16^mm9 t'_v - 47^mm2	Q = 9270^mc (maçonnerie à mortier et béton) Q : S_p = 3^mc70 Q : W = 0^mc27 **D = 580 000^f** D : S_p = 231^f7 D : W = 17^f2 D : Q = 62^f6
Rocher (Diabase résistant à 1600^k) taillé en gradins » Pression maxima : 23^k9 »	Fixe *Pin* Billots et Coins	Étage supér^r : 21 Étage infér^r : 11 » » *150mm*	2000^mc (1^mc pour 2^mc de voûte) » »	1^mc24 » »	A pleine épaisseur 6 tronçons, 11 clavages	Tympans en construction *8 mois* Commencement de juillet	t_c = 45^mm t'_v · 82^mm	**D = 614 742^f** (non compris abords et achats de terrains) D : S_p = 241^f1 D : W = 14^f8
Rocher (Grès) apparent » Pression : 5^k »	Fixe *Pin (Bois rond)* Boîtes à sable Coins aux retombées	4 » 1^m58 à la base *40mm*	75^mc (sans le platelage) boulons 1182^k boîtes à sable 192^k sabots des pieux 200^k 1578^k 8100^f	0^mc35 7^k3 37^f5	2 rouleaux : Le 1er, par tranches séparées, d'abord des hautes, puis, entre elles, des basses ; le 2e, en 8 tronçons embrassant plusieurs tranches du 1er, séparés par 9 tranches minces	Pont achevé *92 jours* 15 décembre	t_c { amont 30^mm / aval 35^mm } t'_v = 0	Q = 626^mc Q : S_p = 1^mc86 Q : W = 0^mc19 (Poids de métal armant la plate-forme et ses piles : 8^T 4) **D = 52537^f** D : S_p = 156^f6 D : W = 15^f6 D : Q = 83^f9

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, nº 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, nº 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole 1	PROJET — ENSEMBLE *Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage 2	ENSEMBLE Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados 3	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon* 4	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées* 5	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées* 6	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	PRESSIONS en kg par cm² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	[illegible]
de **Montanges** *France* 1908-1909 Â r[illegible] 4m,12	*109m 49* 5mm RD / RG 62m25	6m,20 *5m 45* Pas de fruit 0m 58	Arc de cercle 80m,29 *20m465* *(moyenne)* $\frac{1}{3,923}$ = 0,255 *50m*	1m,50 *2m,50*	1m,50 *2m50*	Bandeaux : PT[1] Epaisseur 0m44 Longueur en douelle : 0m55 à 0m75 Lits grossièrement bouchardés Douelle et Queutage : L[1] Mêmes dimensions qu'en bandeaux (au moins 0m 250) Jusqu'à 9m91 de la clef, 2 moellons par assise ; au-delà, 3 Calcaire de Villette-Romanèche (Ain) 1974k *Ciment artificiel Vicat n° 1 de Vif (Isère)* *600k* *(250k à 300k à 28 jours)* *Sable de la Valserine* *Joints de 12mm* *Mortier avec très peu d'eau*	Pression maxima Clef [illegible] Naissance [illegible] *Arc élastique* *Méthode analytique de M. Résal* 2 locomotives de 33t Wagon de [illegible]	[illegible]

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

SÉRIE $\hat{\hat{A}}^{1}$ r[te] (⩾ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D**
FONDATIONS	GRANDE VOÛTE							
	CINTRE				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses					
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/0m01² *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher calcaire, résistant à plus de 1000k » » »	Fixe *Sapin* Boites à sable Pistons en hêtre entourés de corde goudronnée Coins de secours en chêne	4 25cm 1m633 *160mm à la clef* *80mm au-dessus des piles*	568 mc 42595 k 98541 f	1 mc07 80 k5 186 f3	3 rouleaux, le 2e, aux reins seulement. Au 1er roul.: 8 tronçons, 10 clavages. (2 clavages à la clef) Au 2e roul.: 6 tronçons, 6 clavages. Au 3e roul.: 8 tronçons, 10 clavages.	Voûtes d'évidement en construction, non clavées aux reins. *68 jours* 7 novembre	t_c amont 85mm, aval 160mm t'_v 0mm2 à 0mm4	Q = 2529mc Q : S_p = 3mc72 Q : W = 0mc09 Q : W' = 0mc20 [5] **D = 354 950f** D : S_p = 522f9 D : W = 12f0 D : W' = 27f7 [5] D : Q = 140f3

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\hat{A}^1$ r^{le} ($\geqslant$ 40^m)

MONOGRAPHIES

PONT SUR L'ADDA, A TREZZO [1, 2] *(ITALIE – Lombardie)*

1370-1377
Détruit en 1416

$\hat{A}^1$ r^{le} ($\geqslant$ 40^m)1

1. Dates. — Entre 1360 et 1370 [3], Bernabò Visconti, duc de Milan, « *commença à reconstruire le château de Trezzo.. en même temps, il fit faire un* « *pont sur l'Adda, d'une seule arche.... avec deux tours de chaque côté. Ce grand* « *ouvrage fut achevé en 7 ans et 3 mois.* » (S'_3).

En 1416 [4], le condottiere Carmagnola, alors au service de Philippe Visconti, duc de Milan, assiégeait le château de Trezzo : comme la garnison recevait, du territoire de Bergame, des secours par le pont (S'_1), il affaiblit sa culée rive gauche (S'''_1), et le jeta par terre le 21 décembre (S_3).

Le pont n'aurait donc existé que 40 ans environ.

En 1775, pour faciliter la navigation, on fit tomber un morceau d'arc (S_6).

2. Le pont était d'une seule arche. — Andrea Biglia, chroniqueur milanais contemporain, l'affirme (S''_1).

Donato Bosso (S_2) et Bernardin Corio (S_3), nés plus de 40 ans après la chute du pont, disent que le pont détruit avait plusieurs arches. Mais le même Corio avait affirmé précédemment que le pont construit par Bernabò Visconti n'en avait qu'une (S'_3).

L'Adda coule, là, rapide et profonde ; au XIVe siècle, on n'aurait pas pu y fonder de pile [5] : on n'en voit aucun vestige (S'_3, S_6, S_9).

1. — Trezzo est sur le tramway Bergame-Vimercate-Monza, à 17^{km} de Bergame.

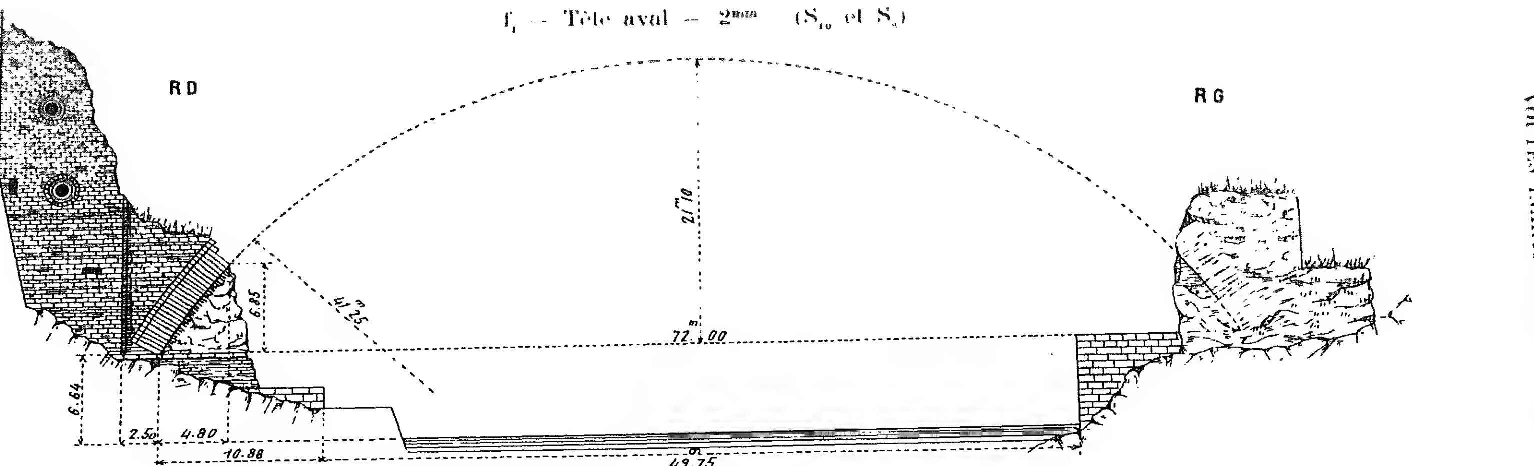
2. — Après 1200, un seigneur de S. Gervasio, petit village en face de Trezzo, construisit en grosses pierres un pont d'une seule arche très pointue. Il fut coupé après 1275, puis refait vers 1279, puis détruit, probablement en 1320 (S_9, p. 24).

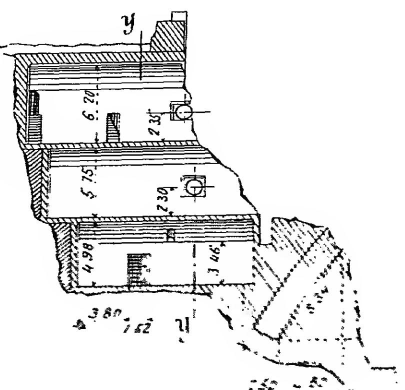
3. — Giulini précise 1370 (S'_4) : il semble que ce soit d'après Corio. Or Corio ne précise pas entre 1360 et 1370 (S'_3).

4. — Giulini (S''_4). D'après Corio, 1417 (S'_3).

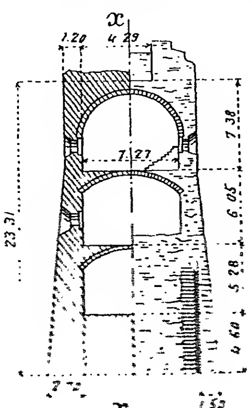
5. — Pour traverser l'Adda, on a exécuté un grand arc métallique :
à Trezzo même, pour la route de Bergame (portée 62^{m}50, – 1884-86) ;
en aval, à Paderno, pour le chemin de fer Bergame-Usmate, à 20^k de Bergame (portée 150^m, - 1887-88).

f₁ — Tête aval — 2mm (S₁₀ et S₂)



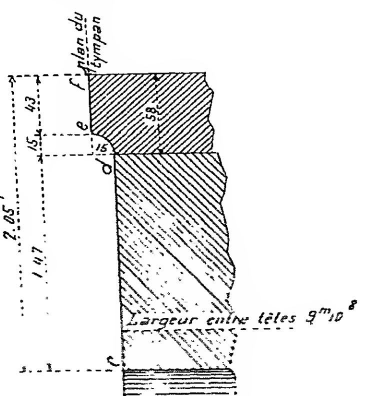


f₂ Coupe sur xx de f₃ (côté amont) 1mm75 (S₁₀)



f₃ Demi-coupe sur yy de f₂ 1mm75 (S₁₀)

f₄ Demi-élévation 1mm75 (S₁₀)



f₅ — Coupe du bandeau — 2cm (S₈)

4. Ce qui reste de la culée rive gauche (Φ_4 - S_3). — On y devine l'appareil en voûte d'une retombée. « *Les ruines même ont péri* » [9].

Φ_4 — Culée rive gauche — aval (S_8)



5. Intrados. — M. l'Inspecteur Général de Dartein a relevé la portée : 72m, — déterminé le rayon d'après les coordonnées de trois points de l'intrados, — puis, avec ce rayon, calculé la montée : 21m10.

Comme le pont de Vérone[10], construit 20 ans avant, il était vraisemblablement en arc surbaissé (Trezzo : 1/3,41 ; Vérone ; 1/4,02). Comme lui, c'était un pont militaire : il assurait un passage entre le château (rive droite) et une tête de pont construite sur la rive gauche, peut-être un passage couvert (S'3), peut-être, comme à Vérone, entre deux files de merlons.

9. — Quelques années avant 1886, on voyait encore sur les deux rives des restes assez importants des deux têtes avec leurs tours, et les retombées sur environ 4m ; ceux de rive gauche ont en partie disparu par l'exploitation des carrières de poudingue (S_9, p. 28).

10. — $\widehat{A}^n$ r[te] (⩾ 40m)1 - Tome III.

SOURCES :

S_1. — « *Historia fratris Andreæ Billii Patriæ Mediolanensis — Rerum Italicarum.*

« *scriptores* » Muratori, tome XIX, Milan, MDCCXXI, Lib. III, col. 44 :

« *Ad Tricium... castra posita.....*

S'_1. — .... « *denique, cum videret Carmagnola non posse satis prohiberi, quo* « *minùs in Castellum multa ex ponte trans Abduam commearent, statuit pontem* « *diruere.*

S''_1. — « *Opus ferme, cui nullum ejus generis par ; quippe omnem gurgitis* « *amplitudinem uno fornice complexus altissimè tendebatur, nec quamvis lateritius* « *ullo ferro solvi poterat, super modum arctissima calcis coagmentatio. Castellum* « *olim cum ponte Bernabos extruxerat.....*

S'''_1. — « *Hunc pontem Carmagnola exteriore planta succisum diruit...* »

(Andrea Biglia, de Milan, de l'ordre des Augustins ; mort en 1435).

S_2. — « *Chronica Bossiana* » (Bibliothèque Nationale, Réserve K. 63 ; Milan MCCCCLXXXXII, non paginée :

« *Anno domini millesimo quadringentesimo sextodecimo,..............................*

Pons Tricii diruitur — « *Vigesimo primo decēbris die Pons lapideus suppositus arci Tricii mirabili* « *opere : pluribus q. fornicibus ex silice fabrefactus diruitur* ».

(Donato Bosso, historien milanais, né en 1456. — Biographie Michaud).

S_3. — « *L'historia di Milano volgarmente scritta dall' eccellentissimo oratore M. Bernar* « *dino Corio, gentil'huomo milanese* », in Vineglia MDLIIII, Bibliothèque Nationale, K. 3101.

Corio cite des événements de « *l'Anno mille trecento sessanta* » ; puis écrit,

S'_3. — page 243, verso :

Ponte sopra Adda fabricato a un solo arco — « *Et Bernabò diede principio alla riedification del castel di* « *Trezo. Similmente fece fare il ponte sopra il fiume Adda : que* « *sto fu fabricato in un solo Arco, che parse mirabil cosa, da* « *ogni banda edificò due Torri, et si grande edificio fu compiuto* « *in sette anni, et tre mesi.*

Corio cite ensuite des événements de janvier et février 1370.

S''_3. — p. 312, verso. « *Poi l'Anno mille quattrocento diciasette.... il Duca* « *deliberò redurre in sua deditione la fortezza di Trezo... Il perche Filippo Maria gli* « *mandò Francesco Busoni di Cremagnola.......................................*
....

« *.....et il mirabile ponte, che già Bernabò Visconte in cinque archi sopra il vivo* « *sasso havea fatto fabricare fece roinare.....* »

Puis vient un événement du 14 février.

(Bernardin Corio, 1459-1519, Milanais, chambellan du duc Ludovic Sforza, dit le More. Chargé, par lui, d'écrire l'histoire de Milan. — *Biographie universelle de Michaud*, tome IX).

S_4. — Giulini : « *Memorie spettanti alla storia, al Governo ed alla descrizione della città* « *e campagna di Milano.* » (Ouvrage publié en 1760-1765).

S'_4. — Vol. V, Lib. LXX, Anno 1370, p. 536.

S''_4. — Vol. VI, Lib. LXXIX, Anno 1416, p. 1416, p. 200, 201.

[d'après Biglia (S_1), Bosso (S_2), Corio (S_3)].

S_5. — G. B. Biadego : « *Del Ponte nuovo sull' Adige a Verona* », — Vérone et Turin, 1885. (Memoria V, p. 279 et Pl. XX). Cette planche XX reproduit une restitution de M. de Dartein, lithographiée à Milan en 1860.

S'_5. — .... id......... Renseignements fournis à M. Biadego par l'Ingénieur Zucconi, de Milan.

S_6. — Luigi Ferrario : « *Borgo di Trezzo ed il suo Castello* », Milan 1867. (M. Ferrario était secrétaire à la section historique et diplomatique des Archives de Milan).

S_7. — Hann et Hosking donnent une restitution peu vraisemblable du pont : « *as it* « *probably existed in 1390* » (*Theory, practice and architecture of bridges*) Londres 1839-1857, atlas, Pl. LXXI).

Croizette-Desnoyers reproduit, (*Construction des Ponts*, tome I, p. 41), cette restitution et celle de M. de Dartein de 1860.

S_8. — Ce que j'ai vu — juin 1908.

S_9. — Ing. Ariberto Crivelli : « *Gli Avanzi del Castello di Trezzo. L'Antico ed il Nuovo* « *Ponte sul l'Adda* », Milan, 1886. (Mémoire que m'a gracieusement communiqué M. le Professeur Jorini de l'Ecole des Ingénieurs de Milan).

S_{10}. — Les dessins f_1, f_2, f_3, f_4, sont faits d'après les relevés de M. l'Inspecteur Général de Dartein, qui m'a très gracieusement prêté ses minutes.

PONT DIT « PONT-Y-TU-PRIDD »[1]

SUR LA TAFE, PRES DE NEWBRIDGE (*PAYS DE GALLES, Comté de Glamorgan*)

Route de Lantrissent à Cardiff

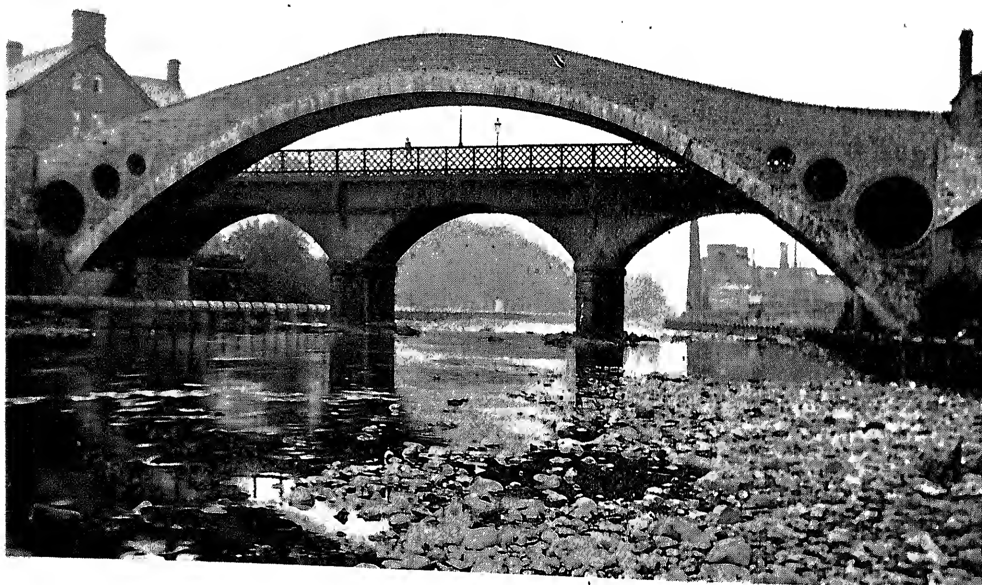
1749-1750 $\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ r[te] ($\geqslant$ 40m)[2]

1. Premier pont (1746-1748). — En 1746, un maçon, « *qui avait acquis* « *quelque réputation dans le pays* », William Edwards, construisit là un pont à 3 arches, qui fut emporté par une crue deux ans et demi après.

2. Deuxième pont. — Edwards devait, d'après son contrat, entretenir le pont 7 ans : il le reconstruisit avec une seule arche de 42m672 (140 pieds) d'ouverture et 10m668 (35 pieds) de montée ; mais, alors qu'il ne restait plus qu'à poser les parapets, la voûte, trop chargée aux reins, se souleva à la clef et s'écroula.

3. Troisième pont (pont actuel, terminé en 1750).

Φ_1 [2, 3]

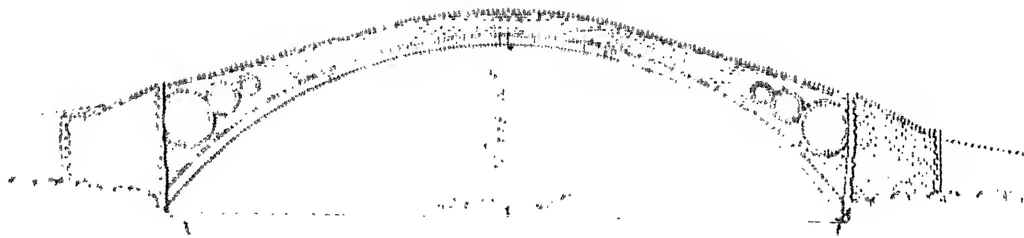


1. — En gaélique : « Pont près de la hutte de terre ».

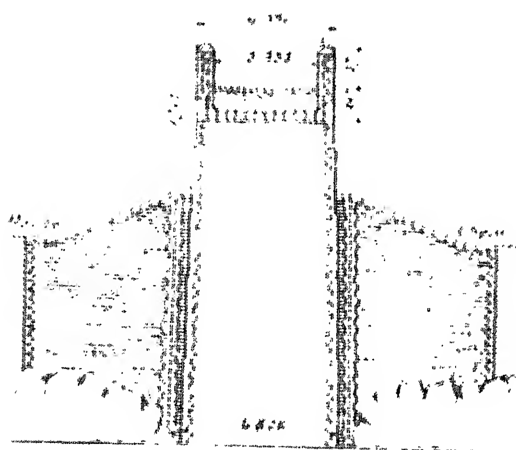
2. — Cliché de MM. T. Forrest et fils, Pontypridd.

3. — Photographie gracieusement communiquée, en juin 1907, par M. H. Waters, Agent général du « London and North Western » à Paris.

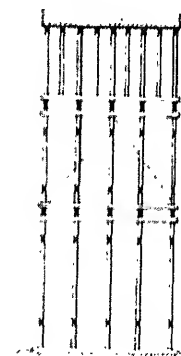
F₁ — Élévation



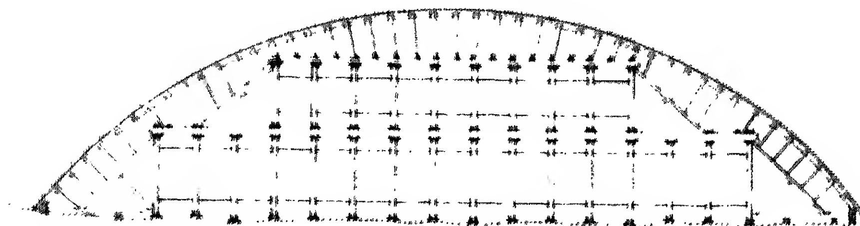
F — Coupe en travers à la clef



F₄ — Coupe en travers du cintre



F — Cintre



[illegible]

Sans perdre courage, Edwards la reconstruisit avec les mêmes dimensions ; mais, soit d'après les conseils de Smeaton qu'il avait consulté, soit instruit par son échec, il diminua la charge sur les reins :

1° – en élégissant les tympans par 3 voûtes annulaires ;

2° – en remplissant de charbon de bois l'intervalle entre les tympans.

Cette fois, la voûte a tenu :

Labor omnia vincit

Improbus,...

Vers 1818, on abaissa les rampes d'accès à 1/4.

4. Auteur : Edwards.

SOURCE :

S. — Institution of Civil Engineers — Minutes of Proceedings, 1846, p. 474, Pl. 40 à 43, n° 269 : « *Account of the Pont-y-tu-Pridd, over the River Tâfe, near Newbridge, in the County* « *of Glamorgan* », Th. Macdougall Smith (Mémoire lu le 4 avril 1838).

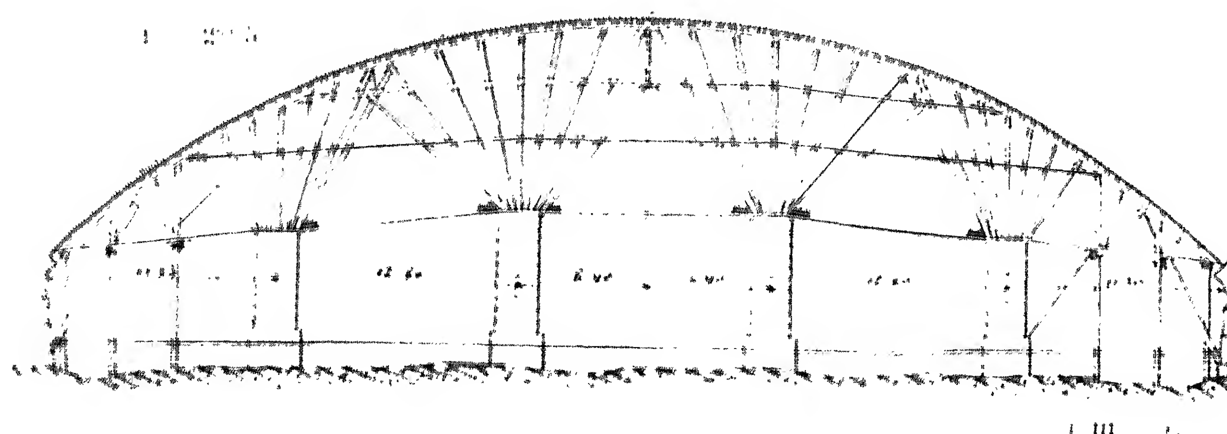
PONT DE GROSVENOR, SUR LA DEE, A CHESTER *(PAYS DE GALLES)*

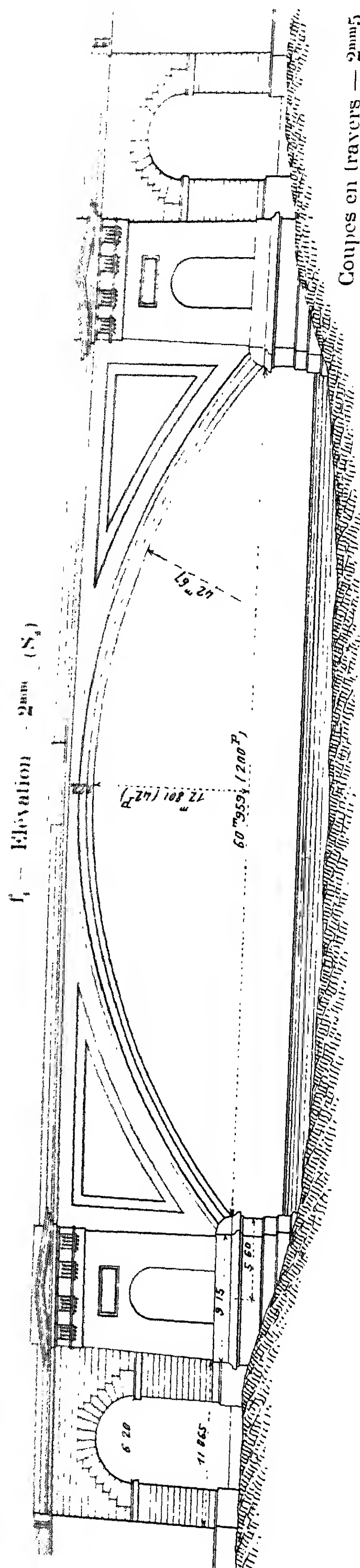
1833-1834 Ȃ r^de 10^m3

Φ (S)

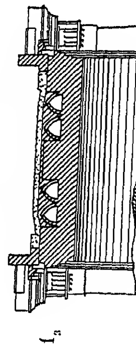


1. Cintre. — 6 fermes, à contrefiches radiales, disposées en éventail, portaient, par des sabots en fonte, sur 4 piles en maçonnerie. Elles étaient réunies en haut, suivant la courbe d'intrados, par deux cours de madriers de 0^m10 chacun (S).

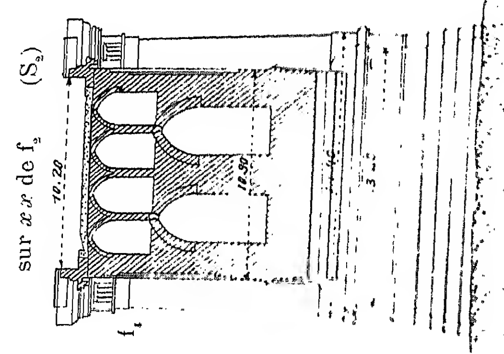




f_1 — Élévation — 2mm (S₁)

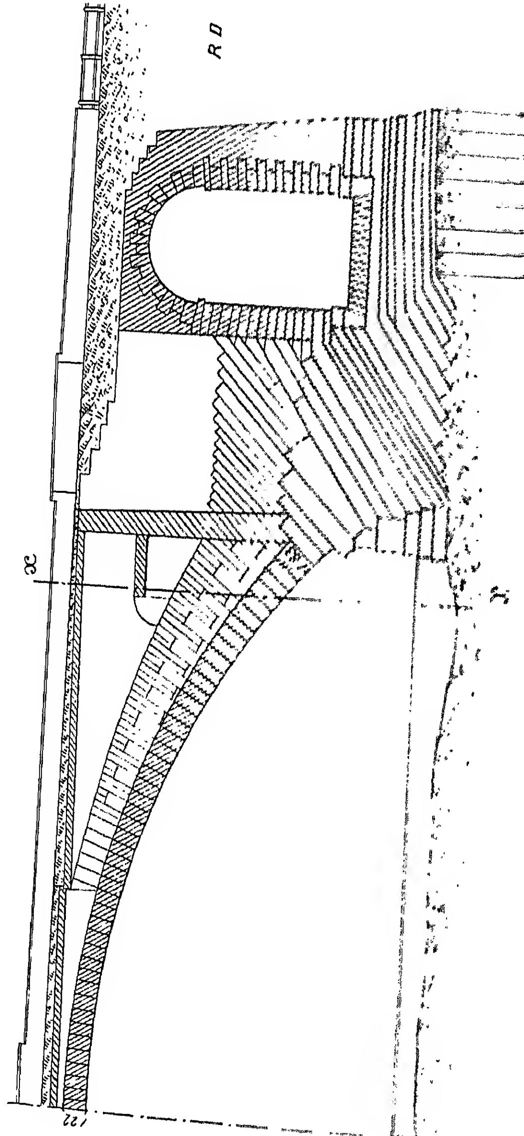

Coupes en travers — 2mm5 à la clef (S₂)

f_3



sur xx de f_2 (S₂)

f_4



f_2 — Coupe en long — 2mm5 (S₂)

Les couchis de 11^{cm} d'épaisseur, portaient sur des coins, — 2 sur chaque ferme, — de 0^m40 de longueur et 0^m25 à 0^m30 de largeur.

« *Le cintre était divisé en parties indépendantes correspondant à l'intervalle* « *entre les piles en maçonnerie. On pouvait, dès lors, décintrer par parties, en* « *particulier lâcher le cintre aux reins en le maintenant à la clef.* » (S_1).

2. Construction de la voûte. — « *La première assise au-dessus des* « *naissances fut placée sur un coin en plomb de 1 pouce 1/2* (38^{mm}) *d'épaisseur en* « *douelle, et finissant à rien à l'extrémité de son lit..... des bandes de plomb de 8 à* « *9 pouces* (20 à 23^{cm}) *de largeur furent aussi introduites dans les joints, de chaque* « *côté, en montant jusqu'au point où la pression put être considérée comme passant* « *de l'intrados à l'extrados des voussoirs, soit sur environ les 2/3 de la douelle...* » (S_1).

On descendit à la sonnette les voussoirs de clef, après avoir recouvert leurs faces d'une épaisse couche de mastic de céruse et d'huile, et après avoir garni les parois des contre-clefs de feuilles de plomb (S_2).

3. Décintrement (S_2). — On décintra lentement, le mortier étant encore mou, en tenant la clef haute et les reins bas.

4. Personnel (S_2).

Ingénieurs :
- *Projet :* M. Harrisson. — Le projet a été fait 25 ans avant l'exécution (S_1).
- *Exécution :* M. Hartley.

Entrepreneur : M. Trubshaw (auteur du projet du cintre).

SOURCES :

S_1. — Transactions of the Institution of Civil Engineers, vol. I, p. 207 et suivantes.

S_2. — École des Ponts et Chaussées. — Collection de dessins distribués aux Élèves. — Série 3, section A, Pl. 3. « *Pont de Chester* ». — Légendes explicatives des Planches. — Tome I, p. 70.

S_3. — Ce que j'ai vu — juin 1903.

PONT SUR LE TORRENT FEGANA, PRÈS DES BAINS-DE-LUCQUES[1]

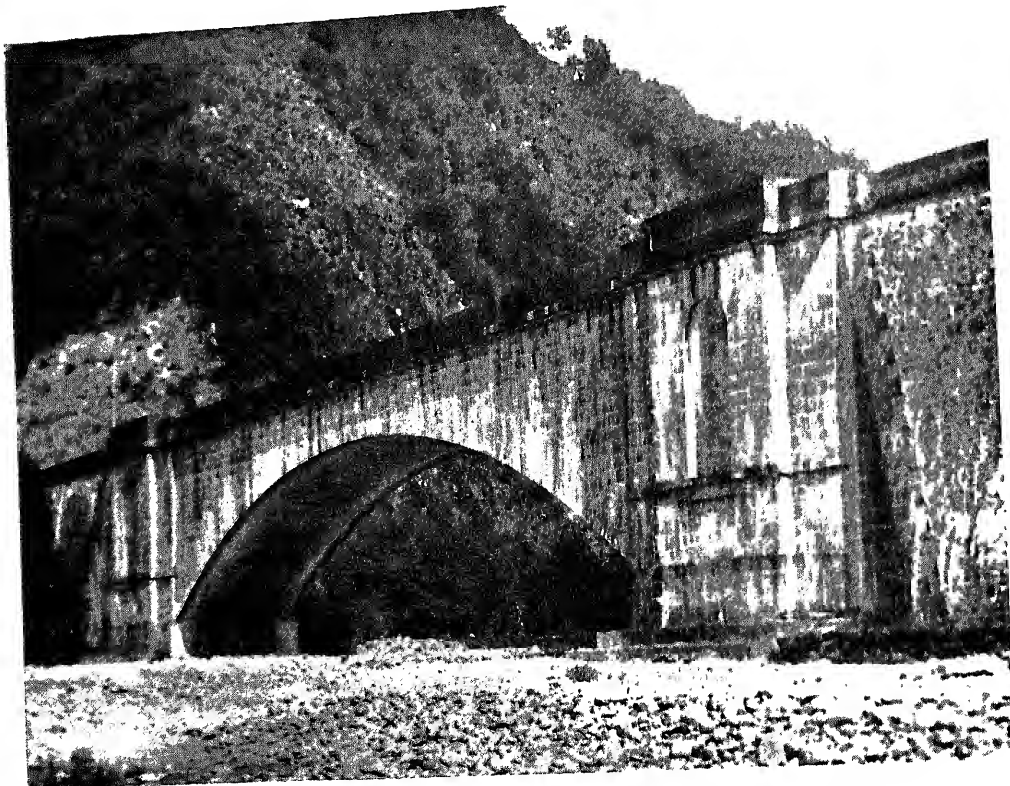
(ITALIE, Province de Lucques)

Route Nationale de Licourne à Mantoue

{ 1845-1847
{ 1874-1877

$\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ r^{te} ($>$ 40^{m})^{4}

ϕ_1 (S_1)



1. Pourquoi on a fait une grande voûte. — Le Fegana a des crues violentes, qui roulent de gros blocs : il emporta là un pont à deux arches, qui remplaçait un pont plus ancien.

Le rocher, qui est à une faible profondeur sur les rives, plonge presque à pic : on ne le trouve plus au milieu.

Il fallait là une grande arche.

2. Histoire. — L'ouvrage fut commencé en 1845. On construisit les deux culées jusqu'au-dessus des niches, et deux amorces de voûte sur 3^{m} environ de chaque côté, soutenues par les murs d'un ancien pont.

A la révolution de 1847, on l'abandonna.

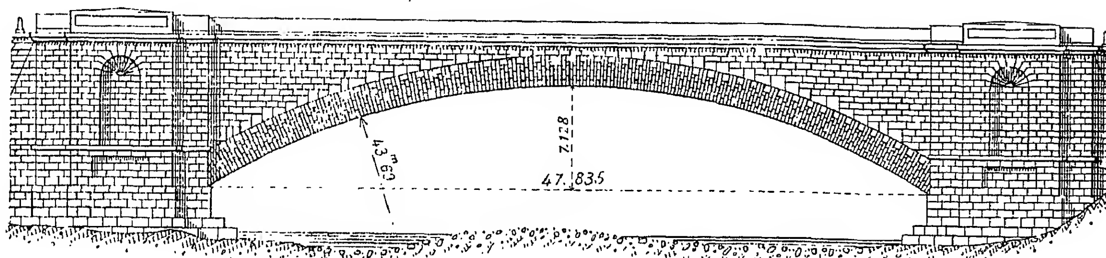
1. — Au point où le Fegana se jette dans le Serchio, à environ 3^{km} des Bains de Lucques, 2[illegible] de Lucques.

On ne le reprit que 27 ans plus tard.

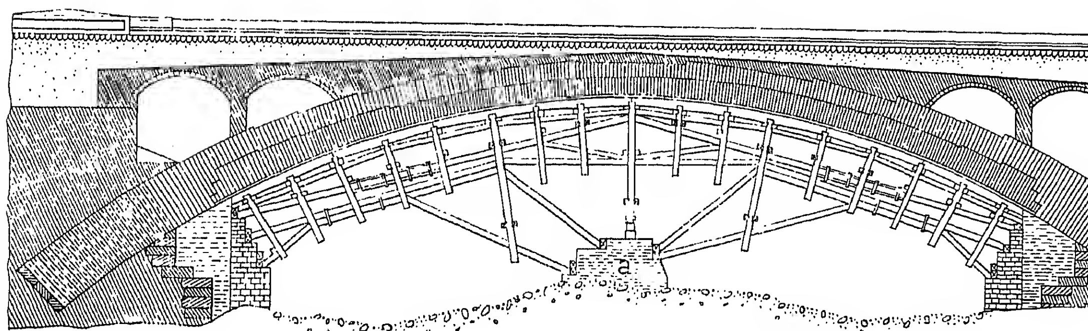
On respecta le projet primitif.

On élégit seulement les reins par deux voûtes transversales (f_2).

f_1 — Élévation — 2^{mm}



f_2 — Coupe en long et cintre — 2^{mm}5



a — Débris d'une ancienne pile.

3. Couronnement convexe. — En élévation, les parapets et la plinthe ont une flèche de 0^{m}08 pour ne pas paraître concaves.

4. Cintre (f_2). — Les pièces du cerveau du cintre portaient sur des caisses à sable ; celles des reins, sur des coins, qui ont mal fonctionné, et qu'il fallut ruiner.

5. Construction de la voûte. — On chargea le cintre à la clef, puis, le 31 août 1874, on commença le premier rouleau.

On mena d'abord en même temps les bandeaux et la douelle ; puis, pour hâter le clavage, on ne posa que le corps en briques, sans les bandeaux.

On changeait chaque jour de côté les équipes de maçons.

Près de la clef, on mit dans le mortier de la limaille de fer.

On termina le premier rouleau, ainsi réduit, le 6 octobre, et on commença, dès le lendemain, le deuxième, relié au premier par quelques harpes.

Aussitôt le deuxième rouleau terminé, on fit un premier décintrement partiel. Puis on chargea de briques l'emplacement à occuper plus tard par les bandeaux (anneau de 1^m20 à chaque tête).

On a donc opéré par rouleaux et par anneaux.

Voici la suite des principales opérations, et les tassements observés :

Opérations	Dates des observations	Abaissements de la clef en *mm.* totaux	partiels Cintre	partiels Voûte
On charge le cerveau du cintre d'environ 100.000 briques (220t)........	1874	40mm	40mm	
Construction du corps en briques. Clavage des rouleaux 1er	6 octobre	57.5	17.5	
Construction du corps en briques. Clavage des rouleaux 2e.	3 novembre	75	17.5	
Premier décintrement partiel........	3 novembre	95		20mm
	1875			
Après le deuxième décintrement........	commencement de janvier	169		74
Troisième décintrement partiel, avant de commencer les bandeaux (on abaisse les 4 fermes intermédiaires en maintenant celles de tête)........	fin avril	187		18
Exécution des bandeaux — Commencement........	10 mai	187		
Exécution des bandeaux — Clavage (on relia les voussoirs des clefs avec ceux de la voûte par des crochets en fer plombés)........	28 juillet	198		11
Quatrième décintrement partiel (Achèvement du décintrement)........	août	200		2
Enlèvement en grand du cintre........	9 août	210		10
Après la construction des tympans jusqu'à la plinthe......		220		10
Après celle des parapets (1250k par mètre courant de parapet)........	commencement de novembre	230		10
	1876			28
	commencement de l'été	258	75	183

6. Fissures observées.

A. - Aux naissances. — Quand chaque attaque du premier rouleau avait environ 3^m, on constata à l'extrados du joint des naissances une ouverture « *presque capillaire* ». Quand on dépassa le milieu du demi-arc, soit à la 5e moise pendante à partir de la naissance, la fissure atteignit 13^{mm} et n'augmenta plus jusqu'au clavage du rouleau.

A mesure que se réduisait la charge de briques du cerveau, les fermes tendaient à se relever et la fissure à diminuer.

Pendant la construction du deuxième rouleau, elle augmenta de 2^{mm} et atteignit 15^{mm}.

B. - *A la clef.* — Au décintrement final du 9 août 1875, on observa à la clef un fil à peine perceptible, la fissure des naissances n'augmentant pas.

7. Composition de la voûte.

	Cube	Pour 1m³ Journées de maçon	Pour 1m³ Journées de tailleur de pierre	Le m³. de voûte est ainsi composé :
Corps en briques, exécuté d'abord sans les bandeaux............	604m³64	0,93	"	Briques..... 0m³783 Mortier..... 0m³217 (Poids moyen : 1751k)
Têtes en pierre de taille .... 141m³89 Lausons en brique 93m³50	235m³39	1,02	1,4	
Total..........	840m³03			

8. Personnel.

Ingénieurs :

Projet : Nottolini, de Lucques.[1]

Travaux : de 1845 à 1847 : Nottolini ; de 1874 à 1877, MM. Giulio Marzocchi, Ingénieur en chef, Salvi, Ingénieur de section et Cappello, Ingénieur adjoint.

Entrepreneur : M. Alexandre Muguaini.

1. Architecte et Ingénieur distingué. Auteur de l'aqueduc de Lucques (459 arches), du projet du pont suspendu sur la Lima à Fornoli près des Bains de Lucques. Mort en 1851.

SOURCES

S1 Giornale del Genio Civile : Gennaio 1878, p. 33 a 54, Tav. III e IV ; Febbraio 1878, p. 81 a 109 : « *Ponte sul torrente Fegana nella provincia di Lucca* », Relazione del cav. Giulio Marzocchi, Ingegnere Capo del Genio Civile.

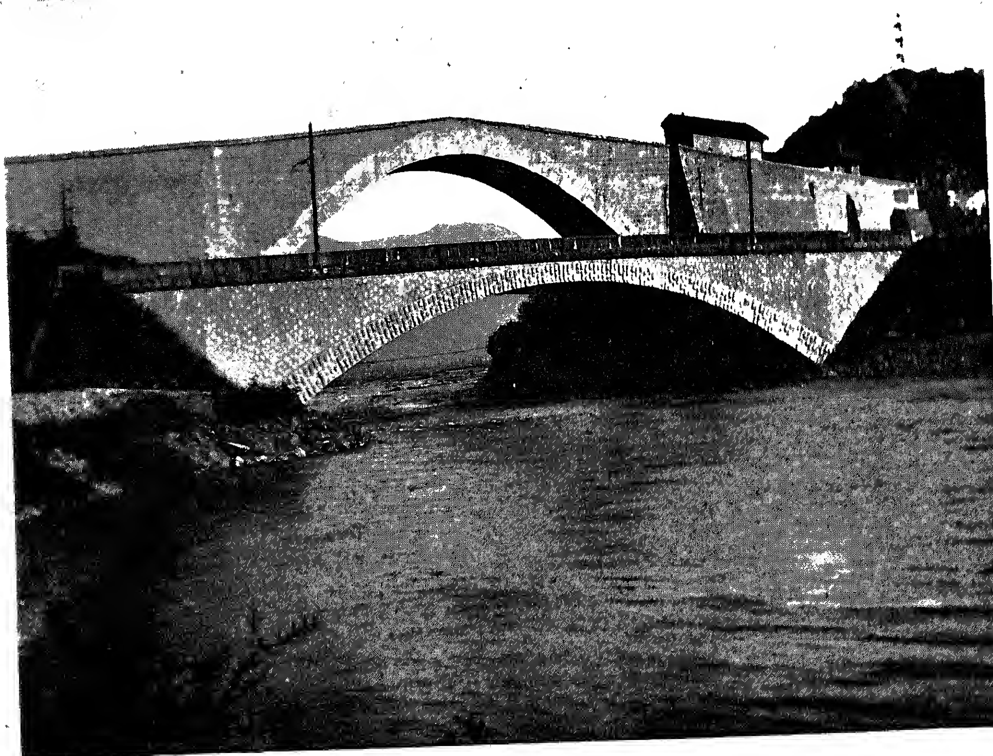
S2 Ce que j'ai vu : octobre 1906

PONT SUR LE DRAC, A CLAIX[1] (ISÈRE)

Route Nationale n° 75 de Châlon-sur-Saône à Sisteron

1873-1874 $\hat{\mathbf{A}}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40m)^5

Φ_1 (S$_1$)



1. Aspect (S$_2$). — C'est un arc à culées perdues.

Il est accolé au pont de Lesdiguières[2] : il en est comme la corde. Ces deux ponts, trop voisins, se font tort.

Le parapet est en grandes pierres de taille debout : au-dessus de cet arc très tendu, à tympans en moellons bruts, un léger garde-corps eût mieux convenu.

Le parapet et la plinthe ont noirci.

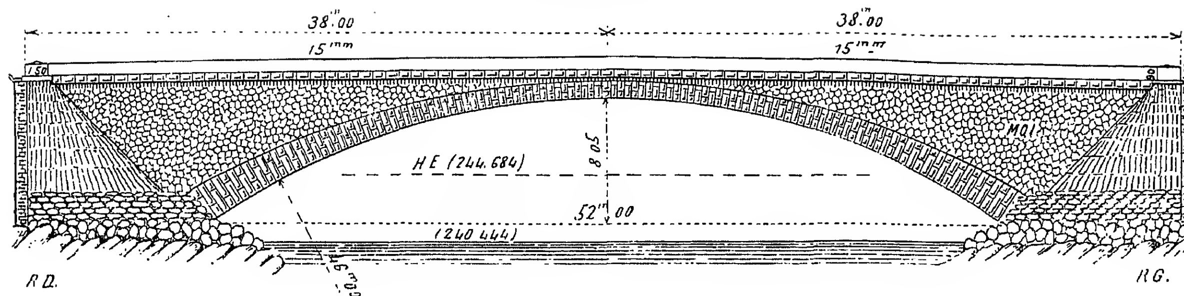
La plinthe, en forte saillie, a bien protégé les têtes.

2. Cintre. — *A. - Appui en rivière.* — Le cintre s'appuyait du côté de la rive droite, sur un caisson sans fond, échoué sur le gravier, rempli de béton, qui était à mortier de ciment sur les 3/4 de la hauteur, et, pour le reste, à mortier bâtard de chaux et ciment.

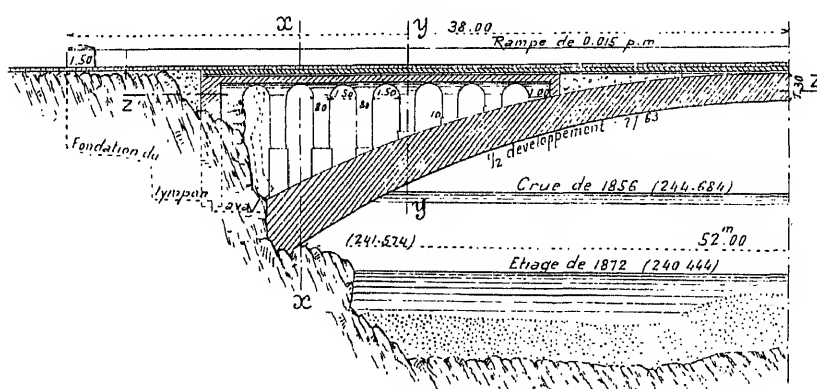
1. — A 8km au sud de Grenoble.

2. — $\hat{\mathbf{A}}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40m)^4 — Tome II.

f₁ — Élévation aval — 2ᵐᵐ

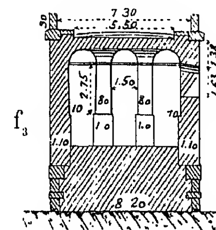


f₂ — Coupe en long — 2ᵐᵐ5

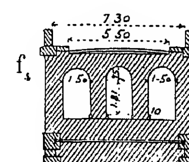


Coupes en travers

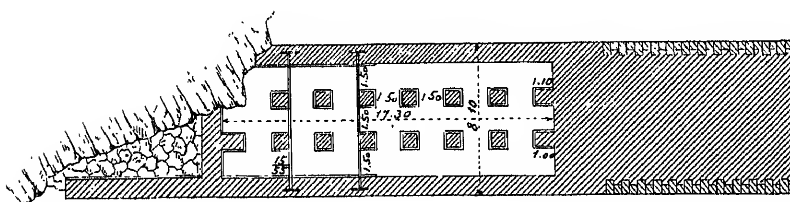
sur xx de f₂



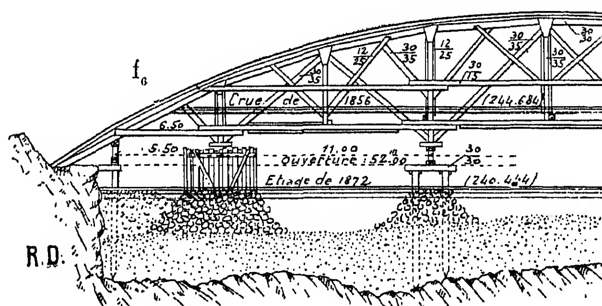
sur yy de f₂

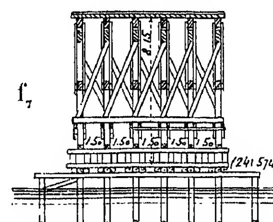


f₅ — Coupe horizontale sur zz de f₂



Cintre — 2ᵐᵐ5





B. - Dépenses (supports compris) :

Appuis	Dragages et déblais	2.326f78	7.707f98
	Maçonnerie	3.780f64	
	Enrochements	1.600f56	
	Charpente		5.562f33
Cintre proprement dit			19.264f63
	Ensemble		32.534f94

3. Fondations. — On a taillé le calcaire schisteux tendre par redans parallèles aux lits des naissances, et rempli tout l'espace entre le rocher et les naissances de maçonnerie de moellons de choix à mortier de ciment.

4. Exécution de la voûte. — On l'a construite du 20 janvier au 26 février 1874, en deux rouleaux, chacun en 4 tronçons d'égal volume (S_2), commençant aux naissances et à 16m63 de la clef, exécutés en même temps.

Aux naissances, on a posé sur cales les deux premiers voussoirs de tête (S_4) ; entre eux, on a fait une maçonnerie provisoire à pierres sèches ; les deux autres tronçons étaient sur des taquets.

Après le clavage du rouleau à la clef et aux reins, on remplaça la maçonnerie à pierres sèches des naissances par de la maçonnerie pleine.

Pendant l'exécution, on changeait, au moins une fois par jour, l'emplacement des équipes de maçons « *afin de ne pas accumuler sur la même partie les défauts* « *qui auraient pu être particuliers à chaque ouvrier.* »

On a clavé : le premier rouleau, aux têtes le 31 janvier, sur le reste le 3 février ; le deuxième, le 27 février 1874.

Pour empêcher le mortier de ciment[3] d'arriver à fleur de pierre, en douelle ou aux têtes, on a garni les joints vus, sur 2cm, de plâtre qu'on a gratté ensuite facilement.

Il a fallu 440 journées de maçon pour faire 827$^{m^3}$210 de maçonnerie (voûte), soit 1$^{m^3}$9 par journée.

5. Décintrement. — La voûte, clavée le 27 février 1874, a été décintrée le 10 avril, 42 jours après. On avait, la veille, substitué aux billots des boîtes à sable.

L'opération a duré 20 minutes.

6. Dépenses.

Cintre			32.534f94
Maçonnerie de la voûte	Moellons		45.435f40
	Pierre de taille		11.207f71
Tympans, voûtes de décharge, murs et béton de remplissage			26.757f42
Bandeaux en pierre de taille		7.015f49	15.208f35
Bahuts en pierre de taille		8.192f86	
Trottoirs, rigoles, perrés et abords			8.419f87
			139.563f69

3. — Le mélange : sable 1$^{m^3}$ ciment artificiel Vicat n° 1 : 1000k, eau : 0$^{m^3}$363, donnant 1$^{m^3}$35 de mortier.

7. Mouvements dûs aux variations de température.

A. - Observations faites par M. Cendre, avant 1879 (S_1). — A la plinthe, au-dessus de la clef, on a constaté 0^m007 pour un écart de 52° (de — 7° à + 45°); 9 fissures dans le parapet et la plinthe, se rouvrant chaque hiver et se refermant l'été : une de chaque côté de l'axe et sur chaque tête, à 27^m environ de part et d'autre de la clef; aucune dans la voûte.

On a observé aussi quelques légères fentes dans les tympans.

B. - Observations faites, sur ma demande, par les soins de M. l'Inspecteur Général Rivoire-Vicat, en septembre 1908.

Joints ouverts

Tête amont		Tête aval	
Rive gauche	Rive droite	Rive droite	Rive gauche
Les 5 premiers du parapet et de la plinthe.	Du 2e au 6e et le 8e du parapet. La plinthe est recouverte de terre.	Les 6 premiers et le 8e du parapet; le 5e de la plinthe.	Le 5e du parapet et de la plinthe.
Le joint du parapet à la clef. La plinthe est couverte de boue.			

Pas de fissures dans les tympans.

8. Personnel (S_2).

Ingénieurs :

Projet. — en chef, M. Berthier; — ordinaire, M. Pasqueau.

Exécution. — en chef, M. Gentil.

ordinaires : jusqu'au 15 octobre 1873, M. Pasqueau, ensuite, M. Cendre.

Entrepreneurs : MM. Muguet frères.

SOURCES :

S_1. — Annales des Ponts et Chaussées, 1879, 1er semestre, p. 5 à 27, Pl. I : « *Notice sur la* « *construction du pont de Claix* », par M. Cendre, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

S_2. — Exposition, Paris, 1878. — Notices, Travaux Publics, p. 8 à 13 : « *Pont de Claix* « *sur le Drac* ».

S_3. — Ce que j'ai vu — juin 1908.

Ce qui n'est pas spécifié S_2 est de S_1.

PONT DU SAULNIER *(LOZÈRE)*

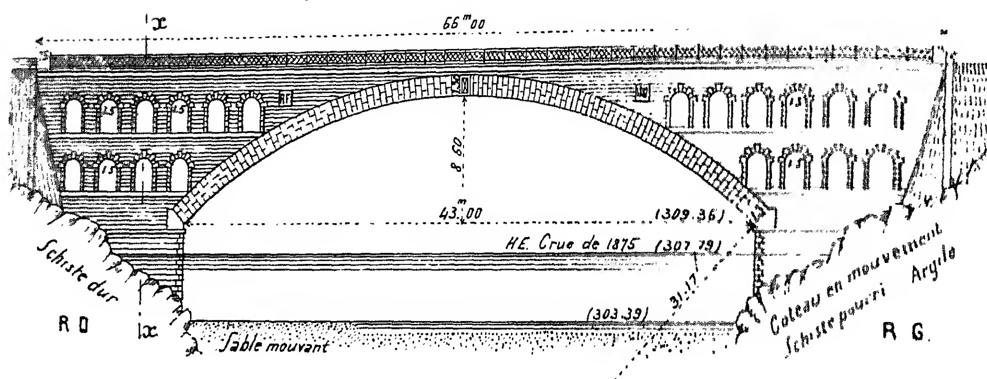
SUR LE GARDON DE SAINTE-CÉCILE D'ANDORGE [1]

Chemin de Grande Communication n° 13 de Florac à Alais

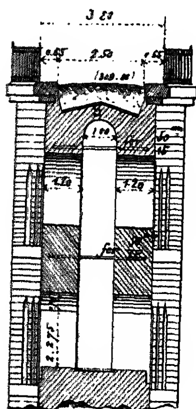
1882
écroulé en 1912

$\hat{\mathbf{A}}^{1}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})^{6}$

f_1 — Élévation aval — 2^{mm} (S_1)



f_2 — Coupe en travers sur xx de f_1 — 5^{mm}



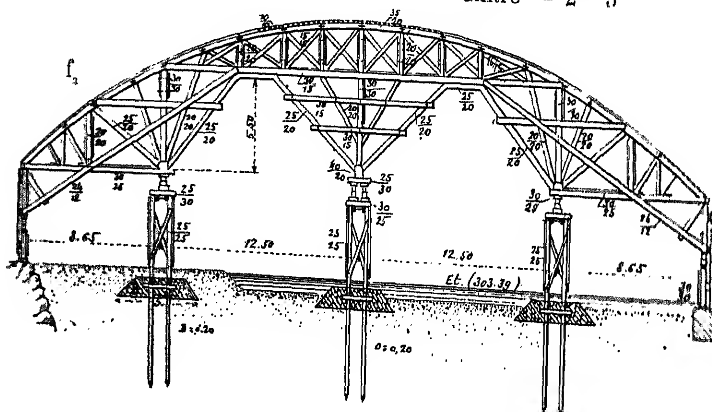
1. Pourquoi on a fait une grande voûte.

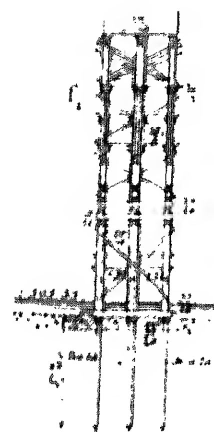
On n'a pas adopté un pont à deux arches, parce que la pile eût dû être fondée à 13^{m}. On voulait, d'ailleurs, exagérer le débouché, parce que, depuis la destruction des forêts qui protégeaient le sol, le Gardon exhausse rapidement son lit.

2. Cintre. — Les trois appuis en rivière reposaient sur des massifs de béton coulé sur des pieux de 5^{m} de fiche.

Le cintre a été taillé et monté, en 4 semaines, par 6 charpentiers.

Cintre — $2^{mm}5$





1. — A 1k1 en amont du Collet de Dèze, à 8k3 en amont de Sainte-Cécile d'Andorge, au raccordement du Chemin de grande communication n° 13 à la Route nationale n° 107 bis.

3. Fondation de la culée rive gauche (26 juin – 9 août 1882). — La culée rive gauche devait reposer, à 1m50 sous l'étiage, sur gravier compact. Le sol de fondation était protégé contre les affouillements par deux enceintes de pieux et palplanches, entre lesquelles on a coulé du béton sur 1m30 de hauteur.

4. Exécution de la voûte (21 août – 4 octobre 1882). — Voici les dates et durées d'exécution :

	Commencement	Achèvement	Durée d'exécution en jours
Rouleaux 1er	21 août	9 septembre	18
[illegible] 2e	9 septembre	25 septembre	16
Remplissage aux reins.	25 septembre	4 octobre	9
		En tout.	43

Les joints des premières assises de voussoirs ont été garnis d'étoupe sur 5cm à l'intrados.

Quand les 1er et 2e rouleaux sont arrivés près de la clef, on les a clavés provisoirement au moyen de pièces de bois pour soulager le cintre.

Pendant la construction, le cintre n'a pas tassé.

5. Décintrement. — On l'opéra en trois fois :

Dates (1882)	Abaissements du cintre en mm	Mouvements de la voûte
11 octobre	10	La voûte suit le cintre, sauf aux naissances.
14 octobre	30	Le 14 au soir, la voûte est détachée sur 17m, de chaque côté, à partir des naissances ; le lendemain, sur 11m seulement.
4 novembre (24 jours après le clavage du 2e rouleau)	35	La voûte se sépare complètement.

Le tassement total de la voûte a été de 52mm.

On n'y a constaté ni fissure ni écrasement (S).

6. Mouvements postérieurs au décintrement.

1. — Mouvements de la culée rive gauche. — Le coteau qui porte la culée rive gauche (schiste pourri et argile bleue mouillée), s'est avancé à chaque crue du Gardon [1] (S).

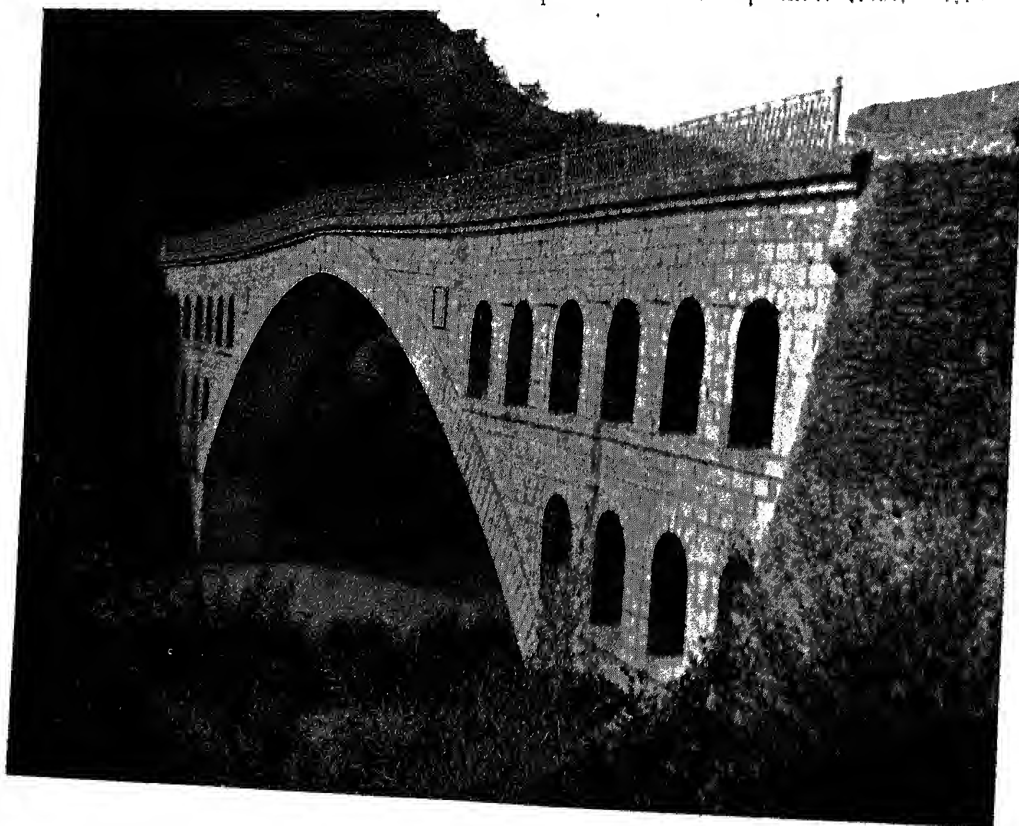
La culée rive gauche a marché avec lui, le haut plus vite que le bas. En mai 1900, son parement antérieur était en surplomb de 0m[illegible] (S) ; à la naissance, il était 11[illegible] plus bas que le projet.

La culée rive droite, fondée sur du schiste en place, n'a jamais bougé.

[1] Le mouvement s'étendait, en 1900, à plus de 300m en plan. La Route nationale n° 107 bis était [illegible] ; un sondage [illegible] de cette route [illegible] est descendu à 15m sans trouver le [illegible] (S).

B. — Déformations de la voûte. — La culée rive gauche s'avançant vers la culée rive droite, la portée diminuait : au niveau des naissances, elle était de 42^{m}80 en novembre 1907 après les grandes pluies d'automne (S_1) ; de 42^{m}68 en mai 1909 (S_3), de 42^{m}65 en juin 1911 (S_4), soit, par rapport au projet, une réduction de 0^{m}35 [3].

Φ_1 — amont (2 septembre 1908) (S [illegible])



Le dessous de la clef était, en mai 1909, de 0^{m}53 plus haut qu'au projet [illegible]

Il s'est élevé :

de 19^{cm} du 15 mars 1908 au 9 février 1911.

de 8^{cm} du 5 avril 1911 au 5 juin 1911.

Si la clef a été placée à la cote du projet, elle aurait été, à cette date, plus haute de 75^{cm}.

3. — Un accident analogue se serait produit à un pont en maçonnerie sur l'Alento [illegible] Bucchiamico à Chieti, construit en 1896 : pont en arc de 18^m d'ouverture, [illegible] de 0^{m}95 à la clef, 1^{m}40 à l'imposte, fondé sur des couches alternées d'argile et de sable.

Deux années après la construction, une culée s'étant avancée vers la rivière, la [illegible] voûte se fendit ; l'ouverture se réduisit à 17^{m}74 à l'amont, 17^{m}77 à l'aval.

Ce pont remplaçait un pont en maçonnerie à 3 arcs de 6^m, construit au [illegible] dut interdire à la circulation à cause des déformations de la voûte.

(Revista de Obras Publicas, 30 novembre 1905 : « *Accidente ocurrido en un puente* [illegible] *el rio Alento* »).

4. — Dès 1892, on a constaté un relèvement de la voûte (S_5).

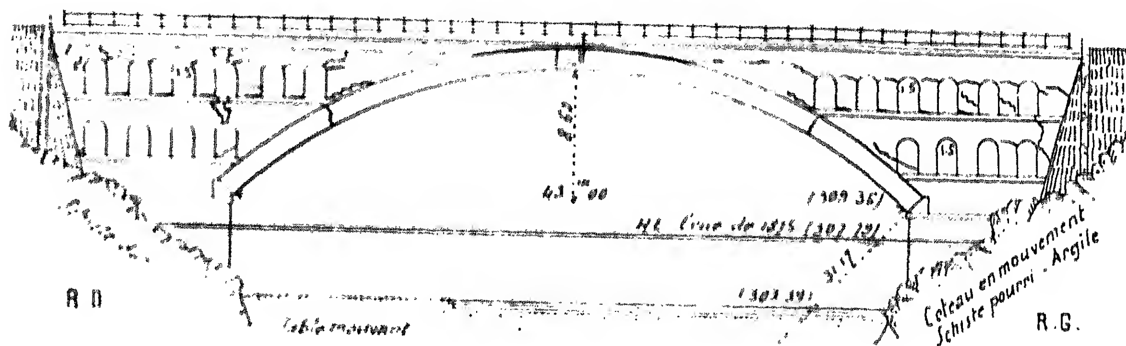
En septembre 1908, la voûte ; à la clef, était ouverte à l'extrados et s'écrasait à l'intrados.

Aux reins, elle était ouverte à l'intrados.

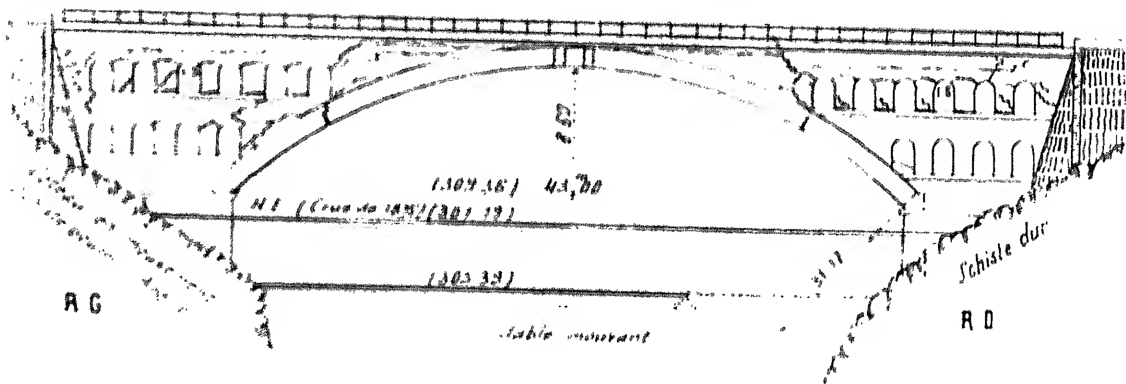
A ces deux points, il n'y avait plus, pour faire passer la pression, qu'une fraction fort réduite de l'épaisseur (environ le 1/3 à la clef, la moitié aux reins, — autant qu'on en pouvait juger d'en bas) (S.).

Etat du Pont — décembre 1908 — 2mm (S.)

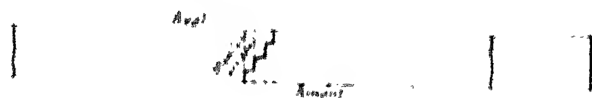
1 — Aval



1. — Amont



3 — Projection horizontale de la douelle



C. — Déformations des tympans (S., S.) (Pl. I, I.). — Les tympans étaient coupés de longues fentes horizontales.

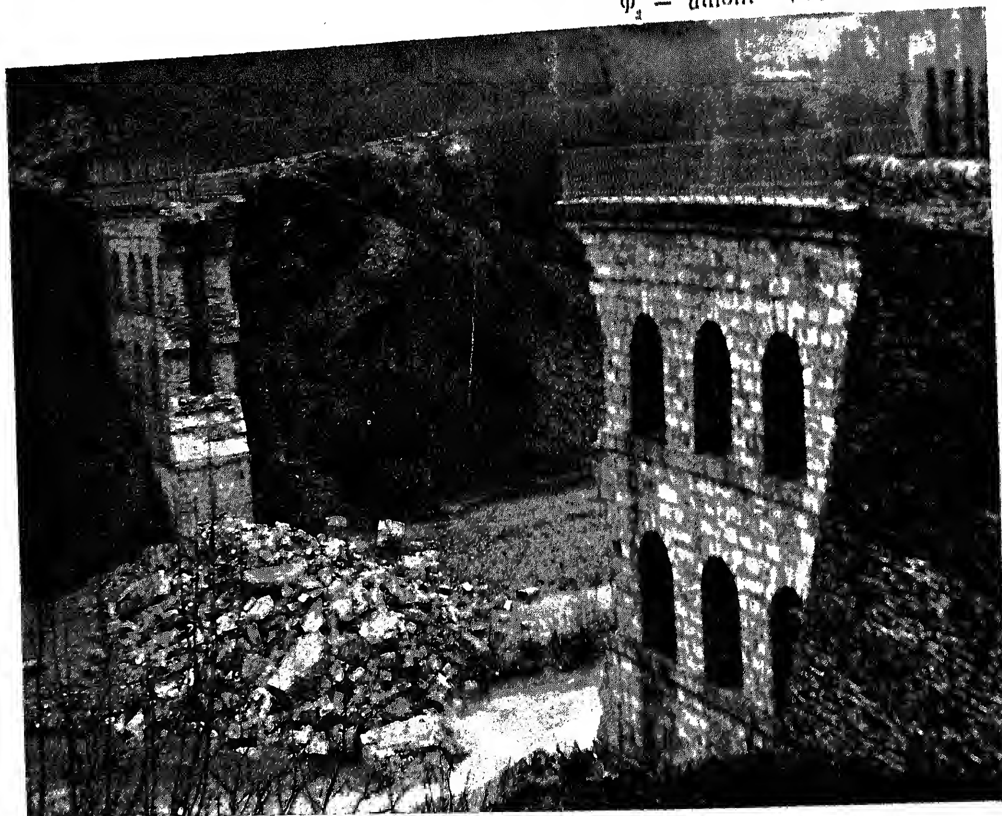
Les voûtes d'évidement, surtout celles de l'étage supérieur rive gauche, s'étaient ouvertes aux reins, et leurs pieds-droits s'étaient inclinés : il y avait, à leur pied, des ouvertures atteignant 9 mm (S.).

Les parapets étaient déformés.

7. Chute du Pont (28 janvier 1912). — Le 19 décembre 1911, 3 assises de douelle se détachèrent, au milieu de la demi-voûte rive gauche (S_4).

40 jours après, le 28 janvier 1912, à 2 heures du matin, le pont s'écroula.

Φ_4 — amont (6 février 1912).



Voici les mesures faites après la chute (S_4) :

	Naissances amont	Naissances aval	Socle amont	Socle aval
Distance entre culées	42m60	42m57	42m67	42m64
Réduction par rapport au projet (43m).	*0m40*	*0m43*	*0m33*	*0m36*

Surplomb des naissances sur le socle (culée rive gauche) : 7 m

Les fissures des tympans au-dessus des culées se sont refermées (S_4).

8. Ingénieur. — *Projet et Travaux :* M. A. Charpentier, Agent Voyer en chef.

SOURCES :

S_1. Annales des Chemins Vicinaux, tome XXXIX, 1883, p. 3 à 25, Pl. I et II : « *Notice « sur la construction d'un pont en maçonnerie au Saulnier, près le Collet de Dèze, sur le Gardon « de Sainte Cécile d'Andorge* », M. A. Charpentier, Agent-Voyer en chef de la Lozère.

Cette même notice a paru dans le Portefeuille des Conducteurs des Ponts et Chaussées, 1883, 18e série, n°s 2 et 3, p. 5 à 9, Pl. 3 et 4.

Relevés qu'ont gracieusement fait faire, sur ma demande :

S_2. en décembre 1908, M. Chevalier, Ingénieur en chef des Chemins de fer Départementaux.

S_3. en mai 1909, M. Thibeaud, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées à Mende.

Renseignements qu'ont bien voulu donner :

S_4. à M. Thibeaud, M. Nosley, Conducteur principal des Ponts et Chaussées à Florac (février 1912) ;

S_5. à M. Meuse, Ingénieur de la Compagnie PLM à Alais, M. Michel, Agent-Voyer au Collet de Dèze (février 1912).

S_6. Ce que j'ai vu, septembre 1908.

S_7 Renseignements qu'a bien voulu m'adresser M. Michel (novembre 1912).

Tout ce qui est sans indication de source, est de S_1.

PONT SUR LA BLACK RIVER, A ELYRIA (ÉTATS-UNIS [illegible]

1886 [illegible]



1. Personnel.

Ingénieur : M. E. C. Kinney, alors Ingénieur en chef adjoint [illegible] Pacific Ry ».

Entrepreneur : M. John Weller.

SOURCE :

S₁. — Renseignements et photographie que M. Ralph Modjeski, [illegible] à Chicago, a bien voulu demander à M. Kinney (mai 1909).

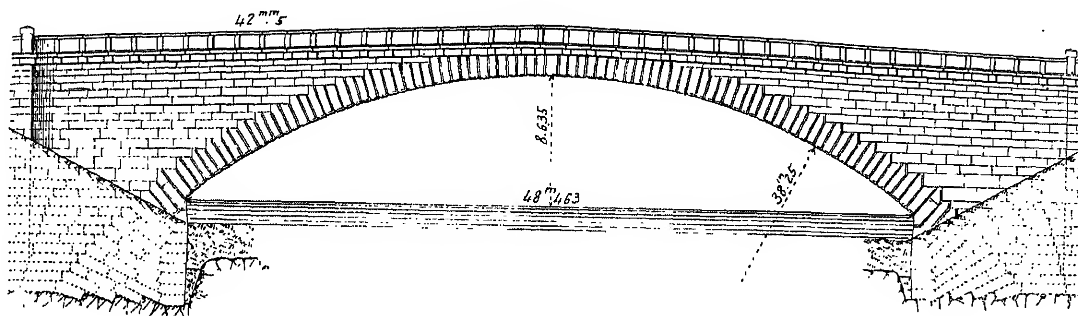
Dans l'« Engineering News » du 31 mai 1890, p. 506, M. Kinney [illegible] pont.

PONT DE LA MAIN STREET, SUR LE WHEELING CREEK,

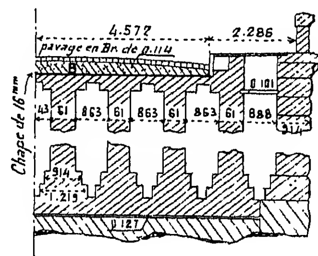
A **WHEELING** *(ÉTATS-UNIS - West Virginia)*

1891-1892 A[1] r[te] (≥40m) 8

ʄ1 — Élévation — 2mm

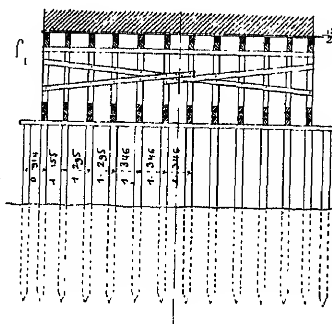


ʄ2 — Demi-coupe en travers — 5mm

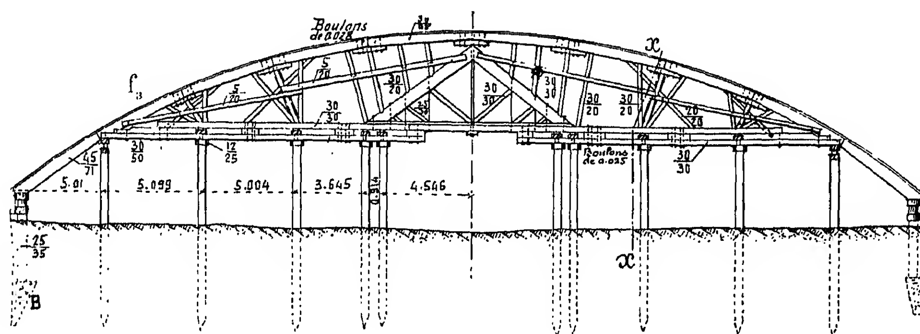


Cintre

Coupe en travers sur *xx* de ʄ3 — 2mm5



Cintre — Élévation — 2mm5





1. Personnel.

Ingénieurs : MM. Hoge et White.
Entrepreneurs : MM. Paige, Carey et Cie.

SOURCES :

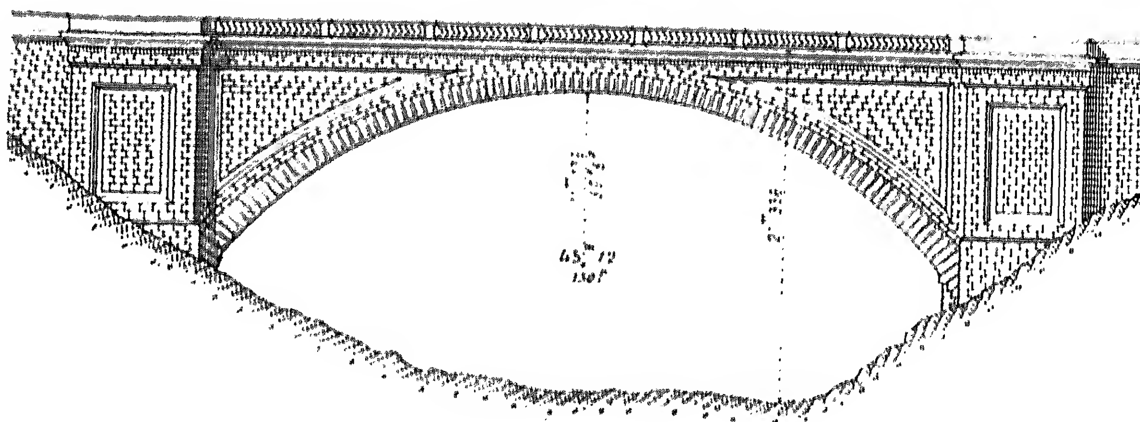
S_1. — Dessins d'exécution, photographie et renseignements, gracieusement communiqués, en mai et juin 1908, par M. Malverd A. Howe, M. Am. Soc. C. E., Directeur du « Department of Civil Engineering and Architecture » du « Rose Polytechnic Institute » à Terre-Haute (Indiana).

PONT DE BELLEFIELD, SUR LE CREUX DE SAINT-PIERRE,

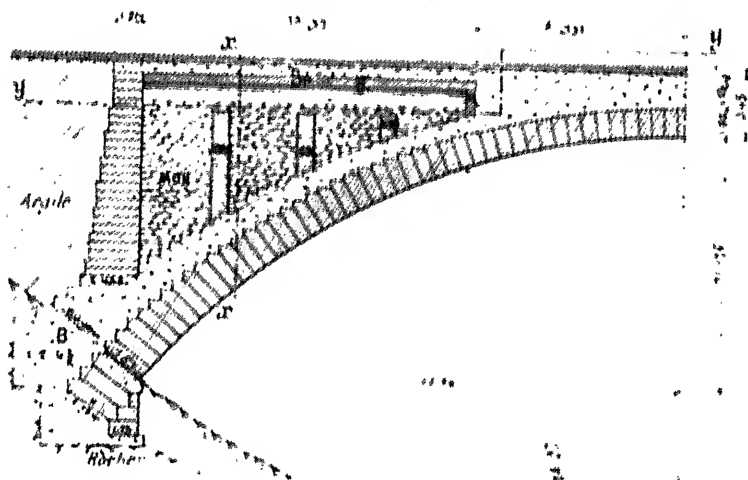
A PITTSBURG[1] (ÉTATS UNIS, *Pennsylvanie*)

1896-1897 $\widehat{A}^1$ p[le] (40m,9)

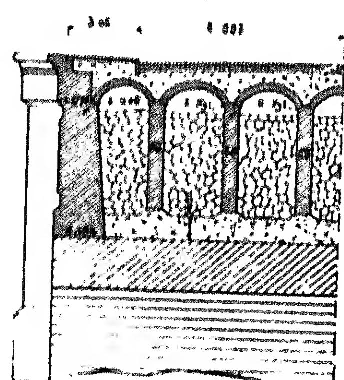
f_1 Élévation[2] 2mm



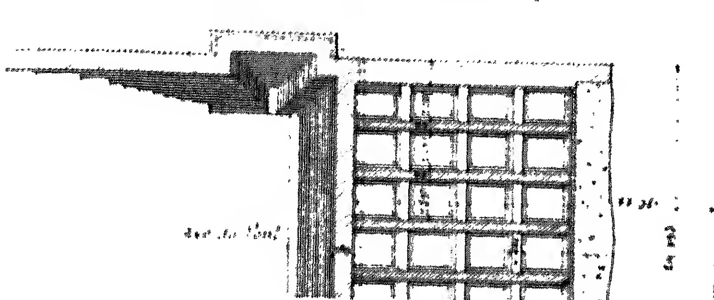
f_2 Coupe en long 3mm



f_3 Coupe en travers sur xx de f_2 3mm



f_4 Coupe horizontale sur yy de f_2 2mm



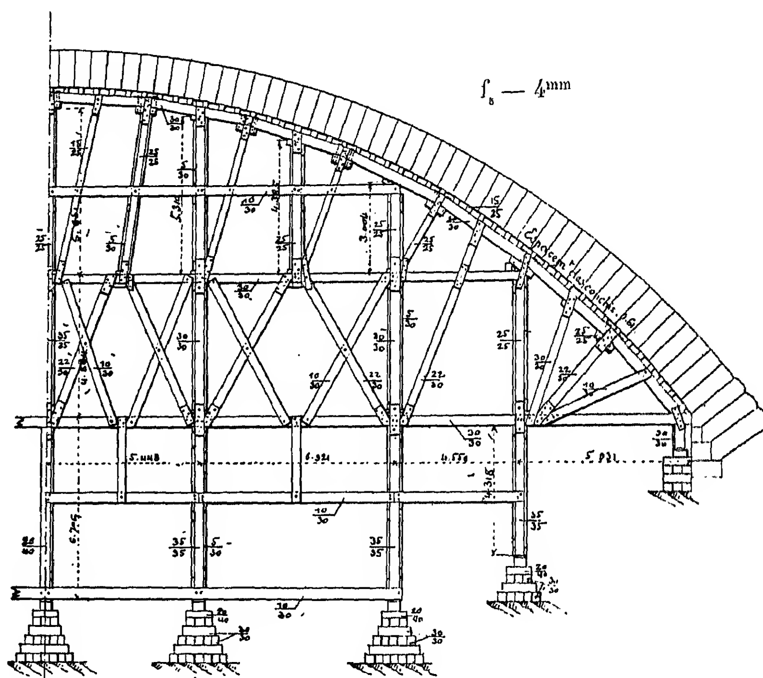
I. Matériaux de la voûte (f_2, f_3). La douelle et les bandeaux sont en pierre de taille de 1m219 à la clef, 1m829 aux retombées.

Sauf sur 2m13 à partir de chaque tête, la douelle porte un 2me rouleau en béton.

1. A l'entrée principale du Parc Schenley.
2. Restituée d'après une photographie (8, p. 540).

2. Chape. — Sous le pavage en bois de 30^{cm} d'épaisseur, est une chape en asphalte de 16^{mm}, sur une chape en mortier de ciment Portland de 25^{mm}.

3. Cintre. — L'about inférieur des poteaux, arrondi, s'engage dans des boîtes à sable en fonte.



La partie supérieure des boîtes est garnie de ciment pour conserver sec le sable.

Il n'y a pas de platelage. Chaque assise de voussoirs repose sur un couchis.

Les vaux sont assemblés au sommet des poteaux par des plaques de tôle. Leur extrados n'était pas en courbe; on a dû, après décintrement, retailler nombre de voussoirs.

Au moment de commencer la voûte, les fermes furent mises exactement à leur place au moyen de coins en chêne.

4. Fondations. — Les culées sont en béton (1 volume de Portland, 2 volumes de sable de rivière, 4 volumes 1/2 de pierre cassée à 5^{cm}); sur le béton, 3 assises de libages.

5. Exécution de la grande voûte. — L'extrados de la douelle a été laissé très irrégulier, pour bien lier la pierre au béton.

« *Pendant la construction.., le cintre s'affaissa et provoqua plusieurs fissures....*
« *L'une traversait l'arche d'une tête à l'autre, entre la 12ᵉ et la 13ᵉ assise de chaque*
« *côté; une autre s'étendait de chaque côté, entre la 20ᵉ et la 23ᵉ ; de plus, il y eut,*
« *d'un côté seulement, 3 fissures plus courtes au-dessous des reins à une distance*
« *de 16 à 26 pieds* (4^m87 à 7^m92) *en arrière des têtes. Les fissures avaient une largeur*
« *de 1/16 à 5/32 de pouce* ($1^{mm}5$ à $3^{mm}7$) *et furent soigneusement cimentées avant le*
« *décintrement.* » (S_1).

L'arche fut commencée à la fin de 1896, reprise en juin 1897, achevée le 18 septembre 1897.

6. Décintrement. — Du 30 septembre au 12 octobre 1897, on enleva graduellement le sable des boîtes, en commençant par les palées centrales.

7. Quantités.

Pierre de taille pour voûte	1.874^{mc}
Maçonnerie 1er choix	2.927
Maçonnerie ordinaire	1.462
Briques	300
Béton de ciment Portland	2.397
Béton de ciment naturel	310
Total	9.270^{mc}

8. Personnel.

Ingénieurs :

Projet et exécution : M. Henry B. Rust, M. Am. Soc. CE.
Directeur des travaux : M. E. M. Bigelow, M. Am. Soc. CE.

Entrepreneurs : MM. Neeld et Foley.
M. A. D. Neeld a fait le projet du cintre.

SOURCE

8. Engineering Record, 9 juin 1900, p. 540 et 541 : « *The Bellefield stone arch bridge, Pittsburg* ».

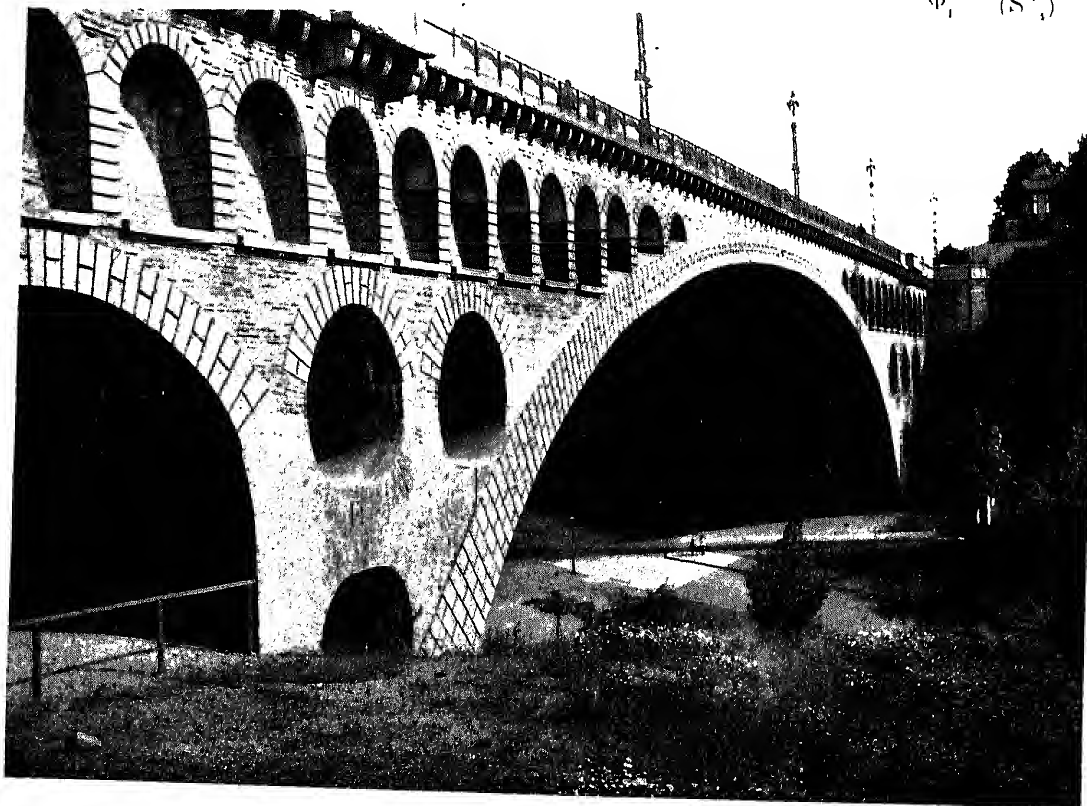
PONT FRÉDÉRIC-AUGUSTE

SUR LA VALLÉE DE LA SYRA, PAR-DESSUS UNE PLACE

A **PLAUEN** *(SAXE, - Voigtland)*

1903-1905 $\widehat{A}^1$ r[le] (≥40m)10

Φ₁ (S"₁)



1. Pourquoi on a fait une grande voûte. — Le pont est entre deux manufactures qui empêchent de le voir : la vallée n'est vide que sous lui, et ce vide n'est que très partiellement occupé par des chemins.

On n'y voit pas de ruisseau.

Les lieux ne paraissent pas imposer, — ni même demander, — une voûte de 90m.

On l'a voulue.

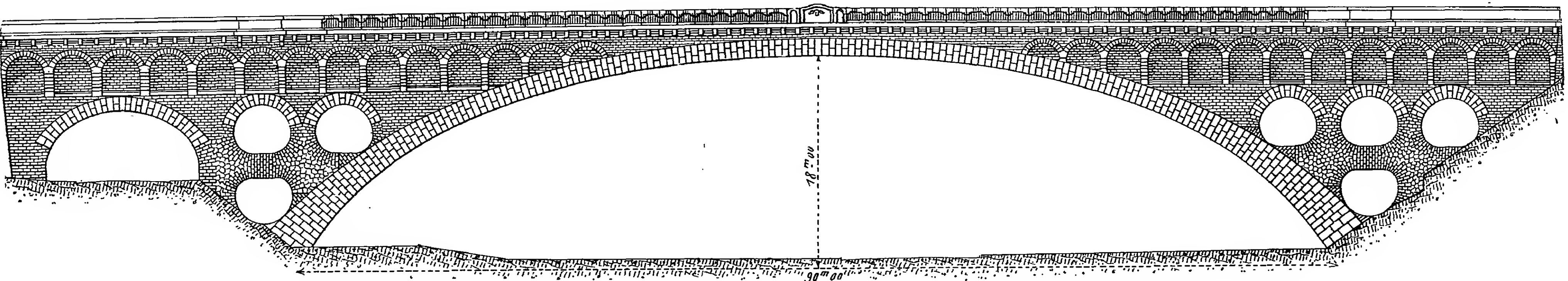
2. Pourquoi on n'a pas articulé la voûte (S_3). — On n'a pas mis de rotules :

1° – parce qu'on n'était pas sûr de leur bon effet;

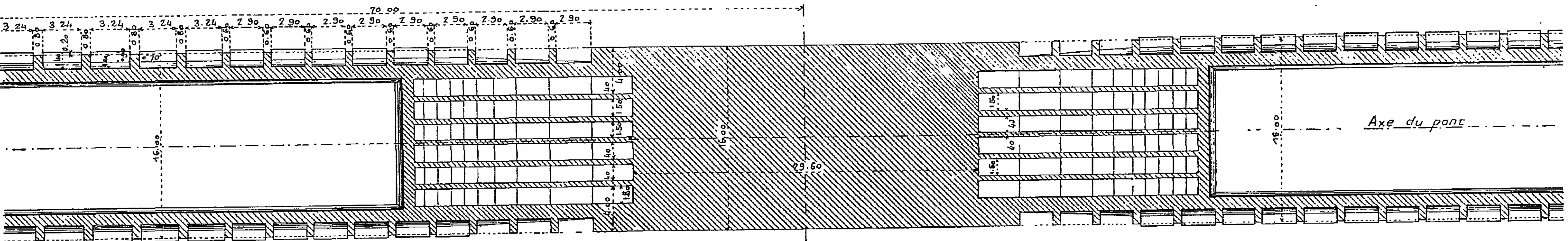
2° – parce que les clavages multiples devaient assurer à la voûte, jusqu'à la fin de sa construction, une souplesse suffisante ;

3° – parce que la voûte est large et que les rotules eussent coûté cher.

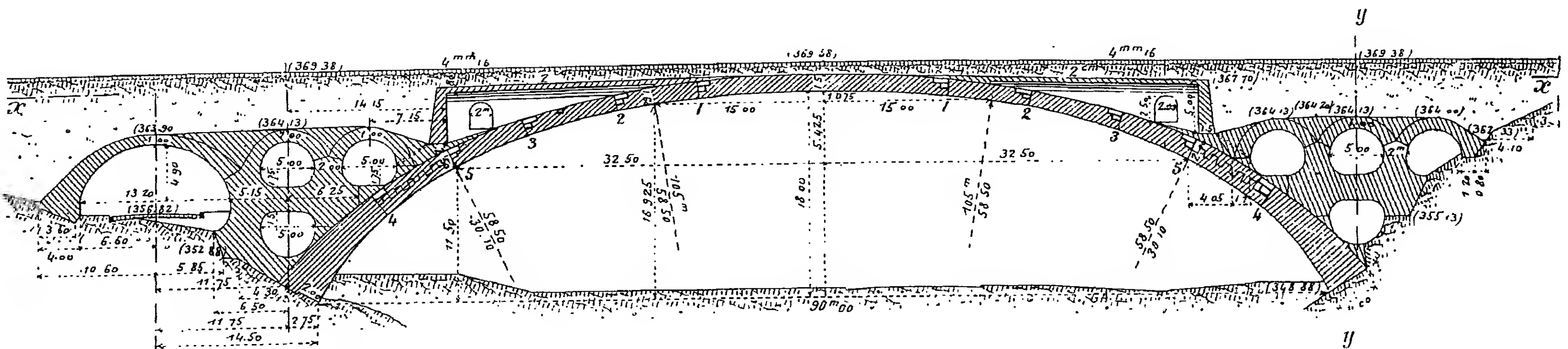
f$_1$ — Élévation — 2mm (S$_1$, S$_2$, Φ$_1$)



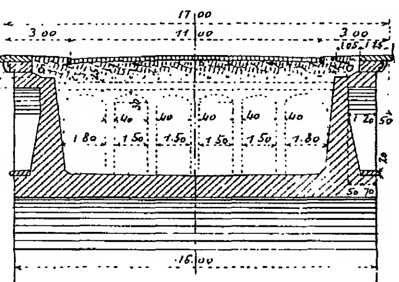
f$_2$ — Coupe sur xx de f$_3$ — 2mm (S$_1$)



f$_3$ — Coupe en long — 1mm5 (S$_1$)



f$_4$ — Coupe en travers sur yy de f$_3$ — 3mm (S$_1$)



3. Tympans (S_1) (f_2, f_3, f_4). — Sur les reins, l'intervalle entre les tympans est occupé par 7 murs longitudinaux supportant de petites voûtes recouvertes de fine cendre de coke. Les deux murs extrêmes, épais, à deux fruits, aveuglent les voûtes transversales d'évidement qui soutiennent le couronnement (f_1, f_3).

Le cerveau et les retombées sont recouverts de plaques d'asphalte ; au-dessus, on a rempli en terre et sable.

On a ménagé dans les tympans, à 32^m50 de part et d'autre de la clef, des joints de dilatation, remplis d'une matière plastique (S_1).

4. Couronnement. Chaussée. — Le garde-corps est en encorbellement sur dalles et consoles de granit ancrées dans les tympans : il est plein aux culées et sur les reins, – à jour au milieu.

La chaussée porte deux voies de 1^m pour tramway (S_1).

5. Matériaux.

A. Pierres. — La grande voûte est en moellons de « *phylitte* » de 10 à 12^cm d'épaisseur, schiste résistant à 1580^k en moyenne (S_2), des carrières de Teuma et Tirpersdorf près Plauen, bien lavés à l'eau sous pression (S_1).

Avec ces petits voussoirs, on a employé 42 à 45 % de mortier (S_2). Cette grande voûte est donc, pour près de moitié, en mortier.

Au lieu de montrer sur les têtes les petits moellons, on a simulé des pierres de taille de granit de gros appareil, par un crépi de 1 de ciment et 5 de sable blanc de la vallée de Lauten (S_1).

On a barbouillé la douelle d'un crépi uniforme, sans lits ni joints. On dirait d'un pont en béton (S_4).

Très évidemment, on s'est peu préoccupé de l'aspect.

B. Mortier. — Le ciment (Portland) devait avoir séjourné 14 jours au moins dans le hangar.

Le mortier à 1/3 de sable normal résistait (moyenne de 6 à 10 épreuves) : à 45 jours, à 407^k à la compression, à 40^k à la traction (S_1) ; après 24 semaines d'exposition à l'air, à 600^k à la compression (S_2).

6. Calculs. — On admis deux hypothèses de surcharge (S_1) :

1° – une file de véhicules à essieux de 1^m25, chargés de 15 tonnes, espacés de 3^m50, avec une foule de 560^k par mètre carré ;

2° – 3 rouleaux à vapeur pesant chacun 23 tonnes, avec une foule de 575^k par mètre carré.

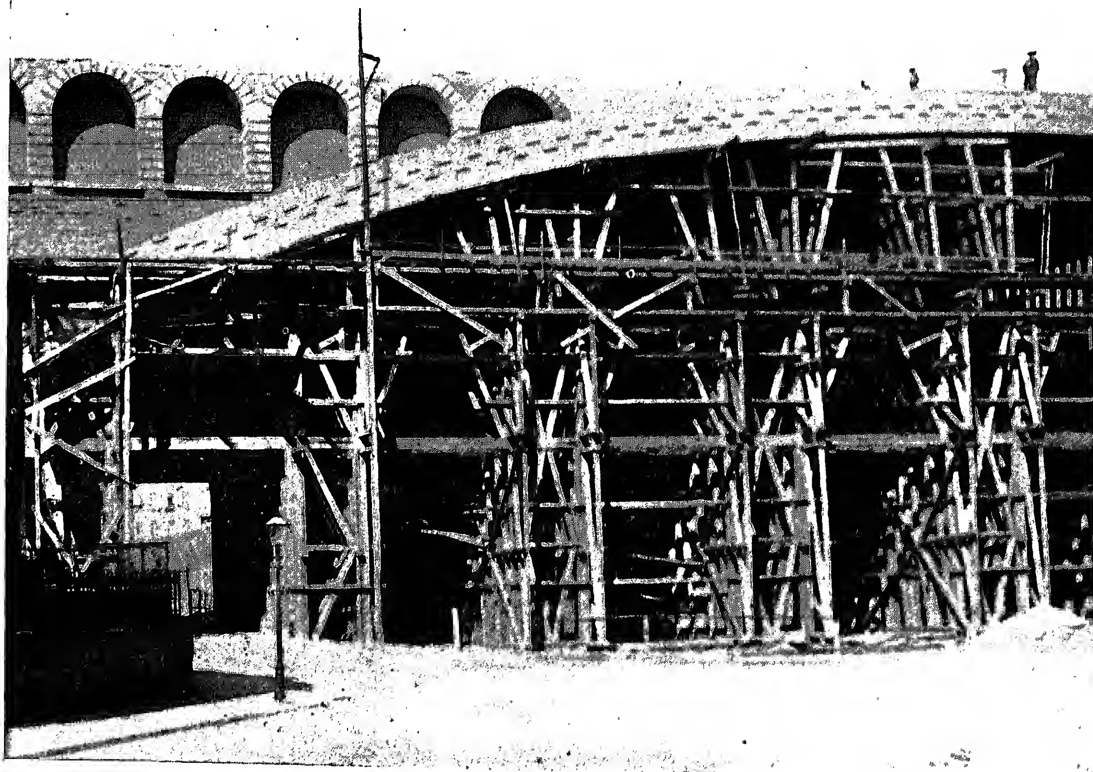
Les efforts ont été calculés par deux méthodes.

Des courbes de pression avec points de passage arbitrairement choisis [1], indiquent dans la voûte surchargée un effort maximum de 53^k4, à 32^m50 de la clef, aux « joints de rupture » (S_2).

En appliquant la théorie de l'élasticité, avec l'aide des lignes d'influence, à une voûte élastique de 65^m d'ouverture, 6^m50 de flèche, portée par deux culées en surplomb de 12^m50, reposant sur un rocher invariable, M. le Professeur Lucas, de l'Ecole Polytechnique de Dresde, a trouvé, pour la position la plus défavorable de la surcharge et en tenant compte de la température (S_1), une pression maxima de 69^k et une tension maxima de 4^k5 (S_2).

7. Cintre. — (Φ_2, f_5, f_6).

Φ_2 (S'_1)



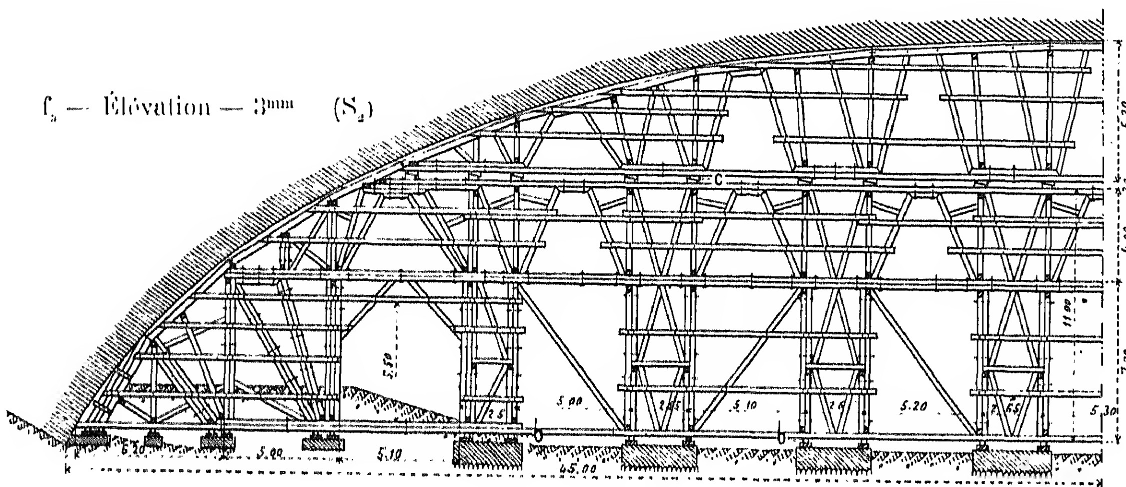
Il a 3 étages de pièces équarries : l'étage supérieur a 21 fermes reposant sur une ligne de coins C (f_5, f_6) qui servent à régler la hauteur des fermes, puis à décintrer (S_1).

Les deux autres étages n'ont que 11 fermes (S_1).

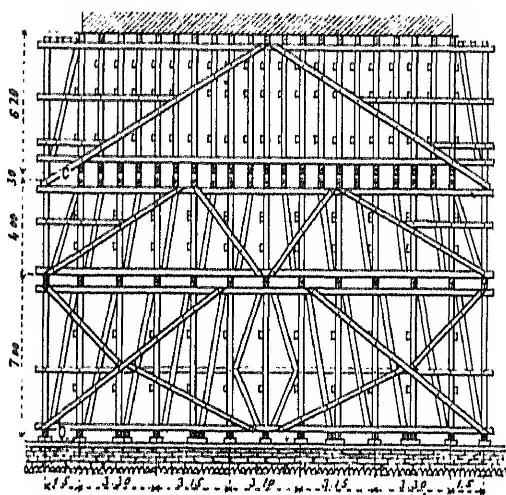
Les palées de l'étage inférieur reposent sur des plate-formes en maçonnerie de ciment de 20^m de longueur.

1. « Stützlinien ».

Cintre


f_5 — Élévation — 3mm (S2)

f_6 — Coupe en travers — 3mm (S1)



En 3 mois, on a approvisionné les bois, construit le cintre (avec 40 charpentiers) ; on l'a monté en 14 semaines (S2).

8. Fondations. — On a bourré les fentes du rocher de maçonnerie à ciment (béton et moellons).

Une galerie de mine abandonnée, qui passait en biais sous la culée Sud, a été remplie de maçonnerie, puis recouverte d'une dalle de béton de ciment, armé de 8 fers en **I** de 0m 36 de hauteur et 16m de longueur (S1).

9. Exécution de la grande voûte. — On l'a construite sur toute son épaisseur, — c'est-à-dire en un seul rouleau [2], — en 6 tronçons, séparés par des vides de 1 à 2^{m} de largeur, et soutenus par des étais en bois, serrés par des coins (S_2).

Les moellons étaient répartis d'avance sur le cintre, avec un poids supplémentaire représentant le mortier (S_2).

On avait préalablement disposé sur le cintre, dans le plan des têtes, des moules à surface intérieure grossièrement dressée avec des joints en saillie pour donner l'aspect de la pierre de taille. On jetait le crépi, à l'état de terre humide, contre ce moule, sur 7^{cm} d'épaisseur, puis on construisait la voûte, en reliant les moellons de tête au crépi avec du mortier de ciment (S_1).

Le crépi faisait ainsi corps avec la maçonnerie de la voûte, et ne s'est pas émietté, comme cela se produit souvent, quand on le pose sur la maçonnerie déjà faite (S_1).

On clava dans l'ordre des chiffres 1 à 5 (f_3), c'est-à-dire, d'abord à partir de la clef, puis à partir des naissances pour finir au joint de rupture (S_2).

10. Décintrement [11 juillet (S_3) - 7 septembre 1904]. — Sous le cintre, entre ses semelles inférieures et les socles maçonnés, avaient été disposés des billots de hêtre rouge de 7^{cm} d'épaisseur, *b* (f_5, f_8) (S_2).

Pour décintrer, on les attaqua à la scie ; leur noyau s'écrasant peu à peu, on put desserrer facilement les coins entre les deux étages supérieurs (S_2, S_3).

La voûte s'affaissa de 82^{mm} à la clef (S_5), sans se fissurer (S_3).

Les tympans s'ouvrirent (S_2), comme on l'avait prévu, à $32^{m}50$ de part et d'autre de la clef, c'est-à-dire aux retombées du cerveau considéré comme une voûte élastique de 65^{m} sur culées en surplomb.

11. Durée de la construction. — On commença la préparation du terrain le 26 mars 1903 (S_2), les fondations le 1er août, la maçonnerie de la voûte le 21 août. On travaillait le soir à la lumière électrique. On fit le dernier clavage le 8 novembre 1903 (S_1).

On reprit au printemps 1904. On construisit les voûtes d'élégissement, les tympans. Les maçonneries étaient terminées fin septembre (S_2).

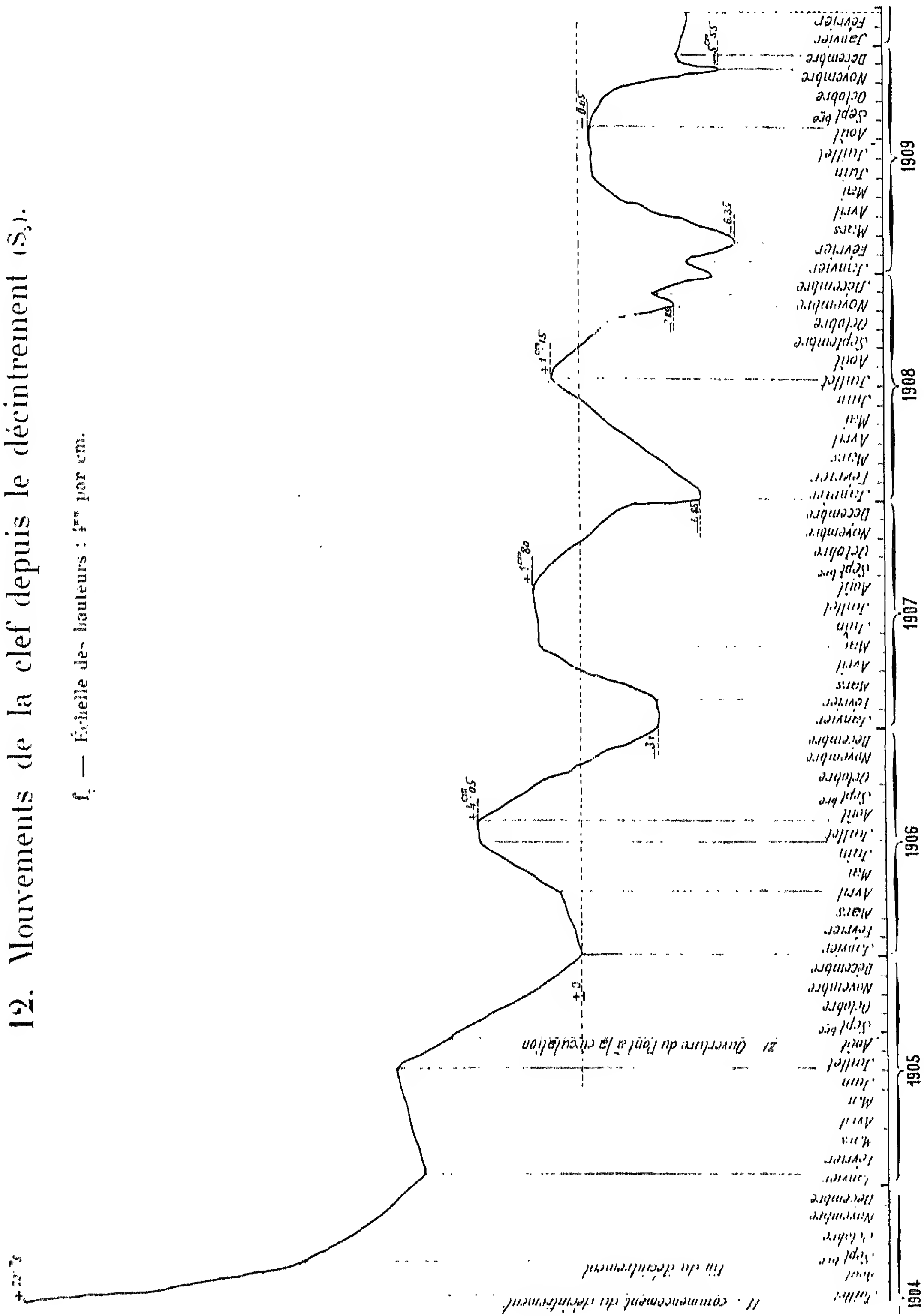
Le pont fut inauguré par le roi Frédéric-Auguste III, le 24 août 1905 [3].

2. — Les moellons de phylitte, bien lités, ont été exactement appareillés suivant le rayon (S_2).

3. — « *Im Reisen seiner Majestät Friedrich August III König von Sachsen wurde diese Brücke am* « *24 August 1905 feierlich dem Verkehr übergeben.* » (Inscription sur la culée rive droite amont).

12. Mouvements de la clef depuis le décintrement (S_1).

f. — Échelle des hauteurs : 1mm par cm.



13. Dépenses (S_3) (non compris les abords).

Fouilles	16.831f76
Maçonnerie et remplissage	465.575f86
Garde-corps en fer et appareils d'éclairage	32.185f19
Chaussée et trottoirs	60.157f50
Divers	39.991f47
Total	614.741f78

14. Personnel.

Projet et Exécution : MM. Liebold et Cie, de Langebrück, près de Dresde (Saxe).

Les travaux ont été surveillés par M. Fleck, Architecte de la ville de Plauen.

1. — Plaque culée rive droite amont : « *Entwurf und Ausführung Liebold u. Cie Langebrück, in* « *Verein mit der Bauverwaltung Plauen. — Bauzeit 1903-1905.* »

SOURCES :

S_1. — Deutsche Bauzeitung, 1904 — nº 57, 16 juillet, p. 354 à 358 ; nº 58, 20 juillet, p. 361 et 362 : « *Die Syratalbrücke in Plauen, i. V* » von Stadtbaurat Fleck, Reg. Bmstr. a. D., in Plauen i. V.

S_2. — « Mitteilungen des Vereines der Ingenieure der k. k. österr. Staatsbahnen », 1er décembre 1904, p. 139 à 142, Pl. VIII : « *Die weitest gespannte Wölbbrücke der Welt* », von Ing. R. Jaussner, Bau-Oberkommissär der k. k. österr. Staatsbahnen in Görz.

S_3. — Renseignements qu'ont bien voulu me donner MM. Liebold.

S_4. — Ce que j'ai vu :

S'_4. — septembre 1906.

S''_4. — août 1908.

S_5 — Renseignements gracieusement communiqués par M. Fleck, — mars 1910.

PONT SUR LA SINGINE[1], PRÈS DE GUGGERSBACH[2] (*SUISSE, – Berne*[3])

1906 $\widehat{A}^1$ r^{le} ($\geqq$ 40^m) 11

Φ_1 (S''$_4$)



1. Matériaux. — Tout est en béton :

en béton non armé, la voûte ;

en béton armé, les murs transversaux sur la voûte, le hourdis sous chaussée et ses nervures (f_2, f_4).

Le parement du béton n'a pas été retouché.

2. Joints de dilatation. Chape. — La plate-forme est coupée par deux joints de dilatation *jj* (f_1, f_2, f_4), recouverts de feuilles de tôle.

Elle est, comme l'extrados de la voûte, revêtue d'une chape en ciment.

3. Efforts dans le béton armé, en kg/$\overline{0^m01}^2$.

Béton (à 300^k de ciment par mc. de béton)	35^k
Acier	1.000^k (traction)

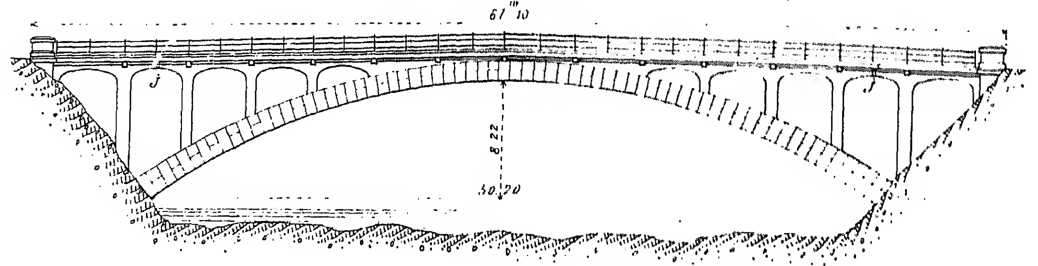
La plate-forme et les nervures ont été calculées comme des poutres continues.

1. — En allemand : « *Sense* ».

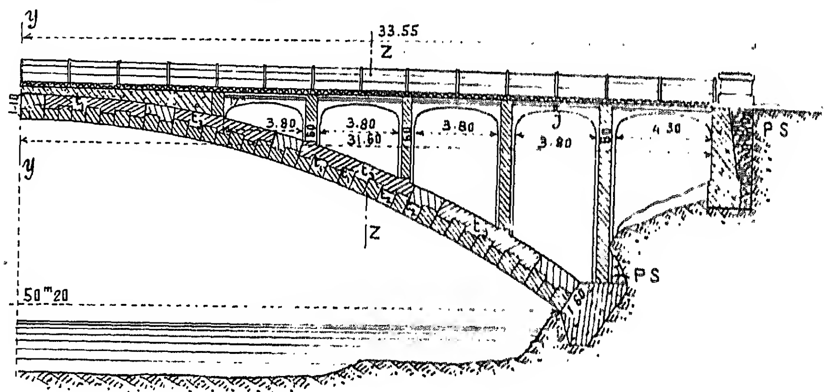
2. — Entre Guggisberg et Planfayon (en allemand « *Plaffeyen* »).

3. — Le pont relie le district bernois de Guggisberg au district fribourgeois de la Singine.

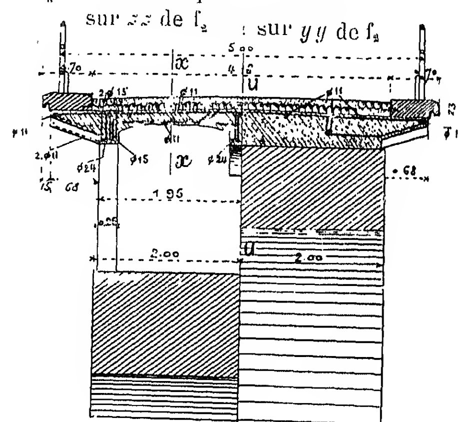
f1 — Élévation — 2mm



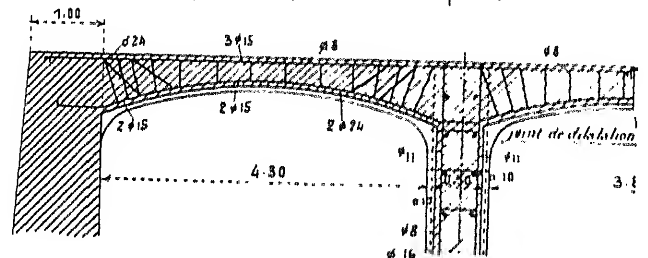
f2 — Demi-coupe en long sur xx de f1 — 3mm



f3 — Demi-coupes en travers — 1cm
sur zz de f2 : sur yy de f2

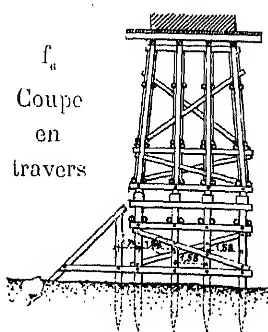


f4 — Nervure du hourdis
Coupe en long sur uu de f1 — 1cm

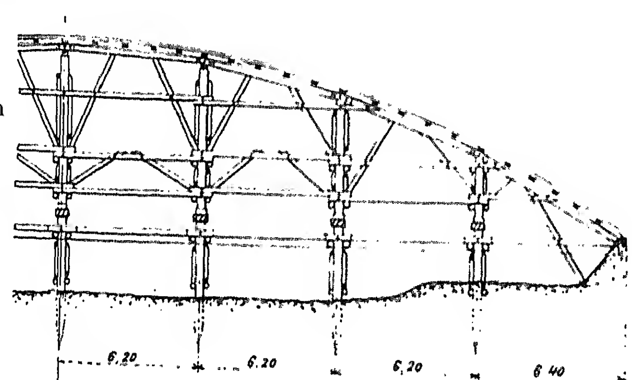


Cintre — 3mm

f6
Coupe
en
travers



f5
Élévation



4. Cintre (f_5, f_6). — Il était en bois en grume, sauf les vaux et les couchis.

Des brise-lame protégeaient les palées contre les bois entraînés par les crues de la Singine, dangereuses en toute saison.

5. Exécution de la voûte.

A. 1er rouleau. — On pilonnait le béton sur toute la largeur de la voûte, par tranches isolées t_1 (f_2) (S''$_4$) ; puis on remplissait, mais sur une hauteur moindre, les intervalles t_2.

On clavait à la clef, aux retombées, et au droit des points fixes du cintre, dans l'ordre que paraissait imposer la déformation du cintre.

Le cerveau du cintre avait été peu chargé : il se releva pendant la construction. On l'abaissa en le chargeant de pierres (S_3).

B. 2e rouleau (S_1). — Le 1er rouleau achevé, on commença immédiatement le second, par paires symétriques de tranches t_3 de la largeur de la voûte (f_2), chaque tranche correspondant à plusieurs du premier rouleau.

6. Dates.

	1906
Commencement des travaux	28 mai
Commencement du bétonnage	13 août
Fin du premier rouleau	31 août
Fin du second rouleau	14 septembre
Achèvement de l'ouvrage	13 octobre
Décintrement	15 décembre

7. Personnel.

Projet : MM. Jäger et Cie, de Zurich.

Direction des travaux : M. G. d'Erlach, Ingénieur à Berne.

Entrepreneurs : MM. Gribi, Hassler et Cie, de Berthoud.[1]

1. — En allemand : « *Burgdorf.* »

SOURCES :

S_1. — Schweizerische Bauzeitung, 29 février 1908, p. 107 à 110 : « *Brücke über die Sense* « *bei Guggersbach* », M. J. Bolliger, Ingénieur à Zurich.

S_2. — Bulletin technique de la Suisse romande, 25 mai 1908 : « *Pont sur la Singine à* « *Guggersbach* », M. Am. Gremaud, Ingénieur cantonal à Fribourg.

S_3. — Renseignements que l'Entreprise a bien voulu donner pour moi à M. d'Erlach.

S_4. — Renseignements (S'$_4$) et photographie (S''$_4$) gracieusement communiqués par M. d'Erlach.

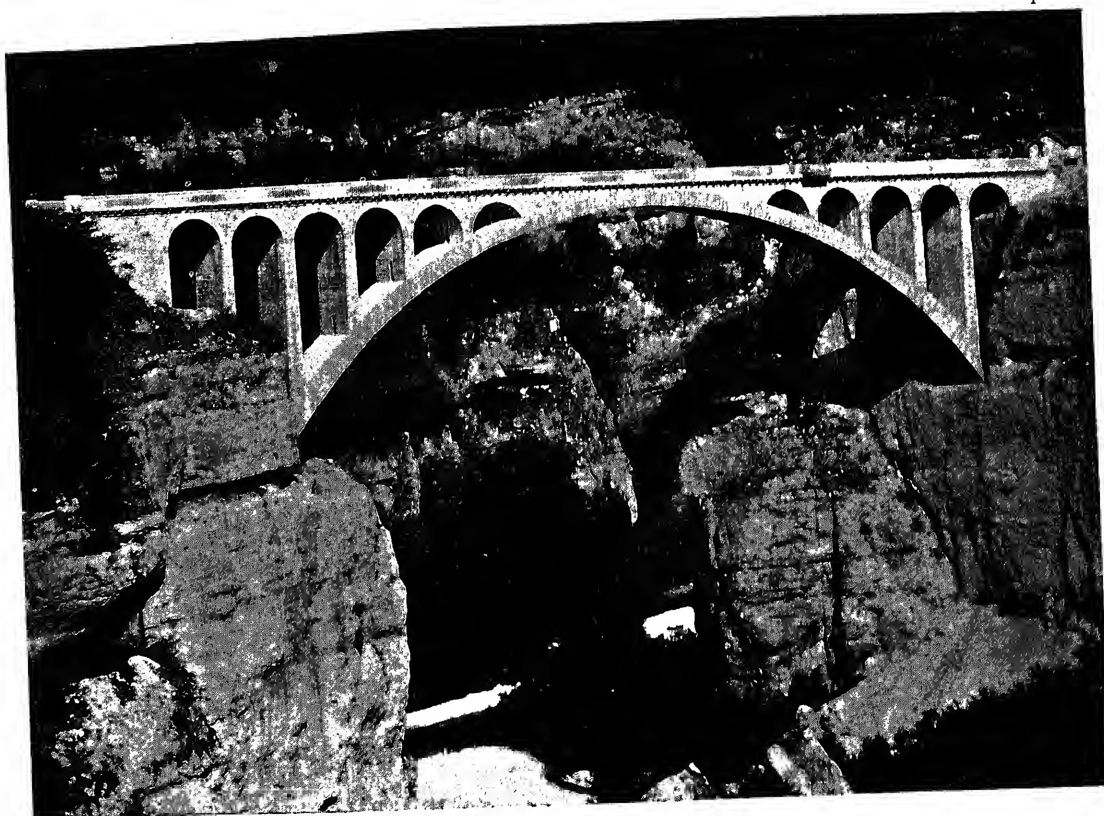
On a pris dans S_1 les dessins, et tout ce qui n'est pas spécifié comme d'une autre source.

PONT SUR LA VALSERINE, AU MOULIN DES PIERRES, PRÈS DE MONTANGES[1] (AIN)

Chemin de fer électrique d'intérêt local à voie de 1m de Bellegarde à Chézery et Chemin de Grande Communication nº 11

1908-1910 $\hat{\ddot{A}}^1$ P^{le} (> 40m) 12

Φ_1^2



1. Dispositions d'ensemble. — Là, dans cette brèche entre ces hautes falaises, une grande voûte est bien à sa place.

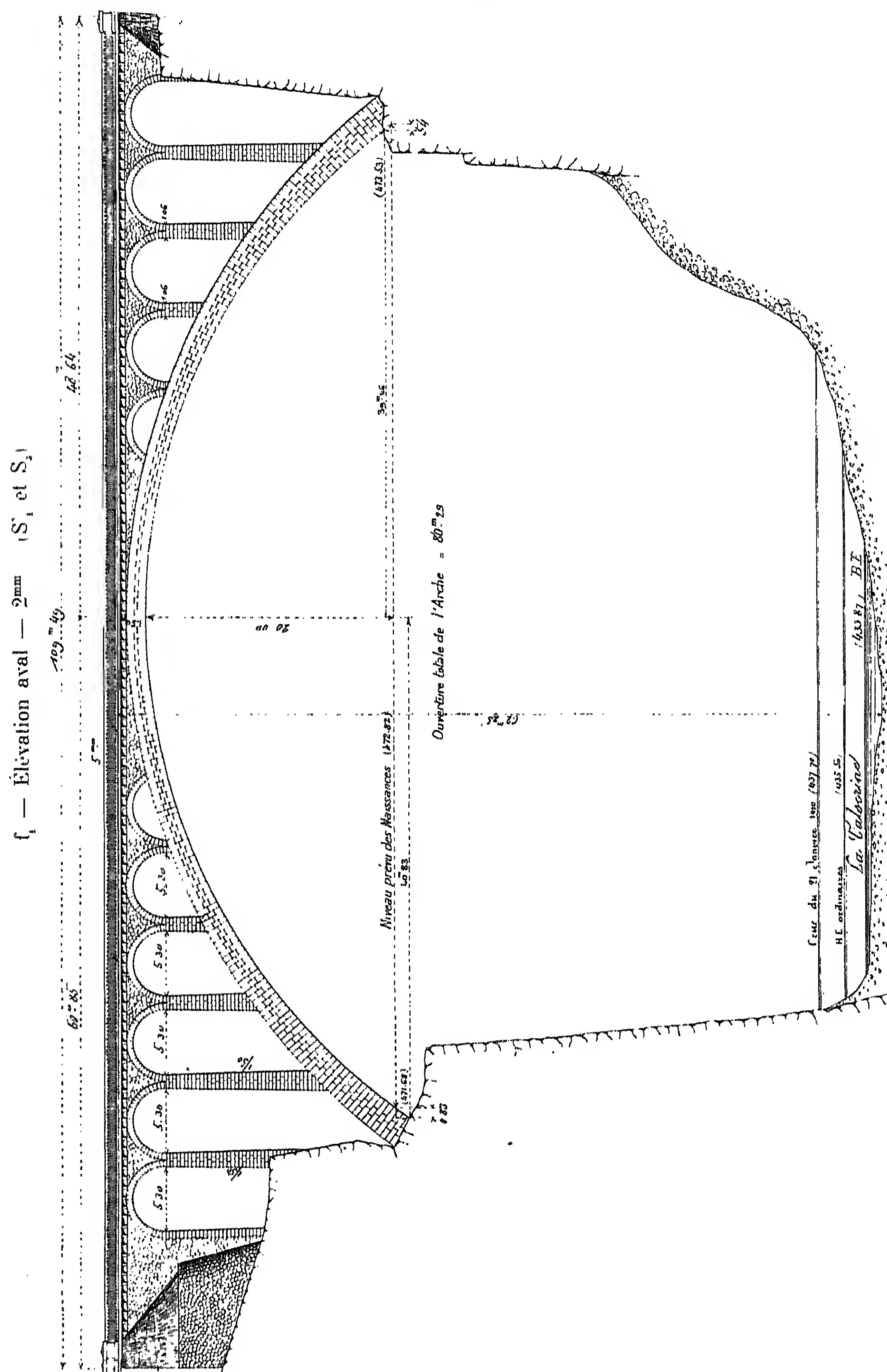
Les naissances avaient été prévues au même niveau. On a abaissé celle de rive droite au-dessous d'un banc de calcaire gélif, et élevé celle de rive gauche pour mieux placer les boîtes à sable. L'ouverture a été ainsi portée de 80^m à 80^m29 (S_2).

Les piles des voûtes d'évidement reposent sur des gradins découpés dans la voûte sur 18^{cm} de profondeur au plus (S_3).

2. Chape. — Elle a 12^{mm}. Elle est faite d'un mélange de 1 partie de bitume liquide et 3 parties de mastic d'asphalte (S_3).

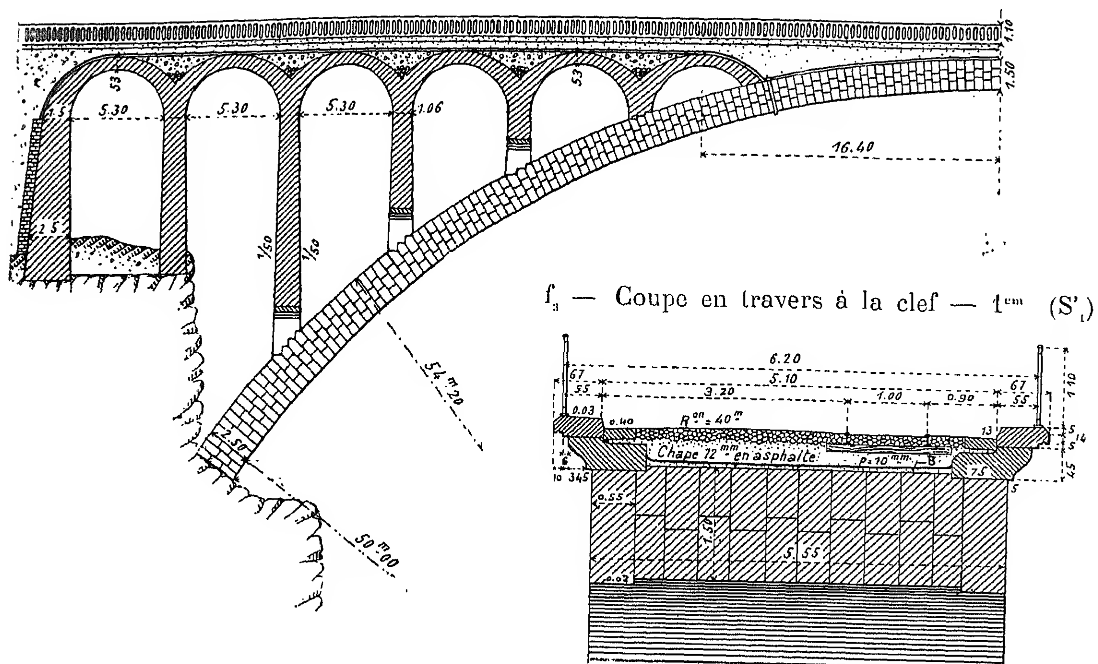
1. — A 8^k en amont de Bellegarde (Ain).

2. — Cliché de M. Ed. Boulland, Photographe à Bellegarde.



f₁ — Élévation aval — 2mm (S₁ et S₂)

f_2 — Demi-coupe en long — $2^{mm}5$ (S'_1 et S_3)

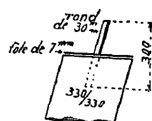


f_3 — Coupe en travers à la clef — 1^{cm} (S'_1)

3. Cintre. — *A. Dispositions d'ensemble.* — Il portait sur 3 hautes piles en bois, reposant sur 3 socles en maçonnerie fondés : celui de rive gauche, sur rochers éboulés ; les deux autres, sur gravier, sable, et gros galets : celui du milieu, sur pieux à têtes reliées par un grillage, noyées sur 0^m70 à 1^m20 dans du béton immergé ; celui de rive droite, sur 0^m70 de béton, dans une enceinte de pieux (S_3).

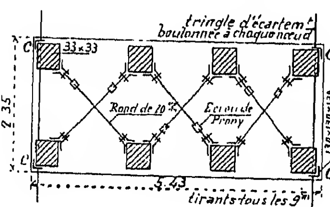
Les poteaux des piles étaient assemblés, par longueurs de 9^m, comme l'indique f_6. Les 4 poteaux extérieurs étaient renforcés par des cornières c (f_7).

f_6 — Assemblage de 2 pièces d'un montant 3^{cm}



Contreventement horizontal d'une pile

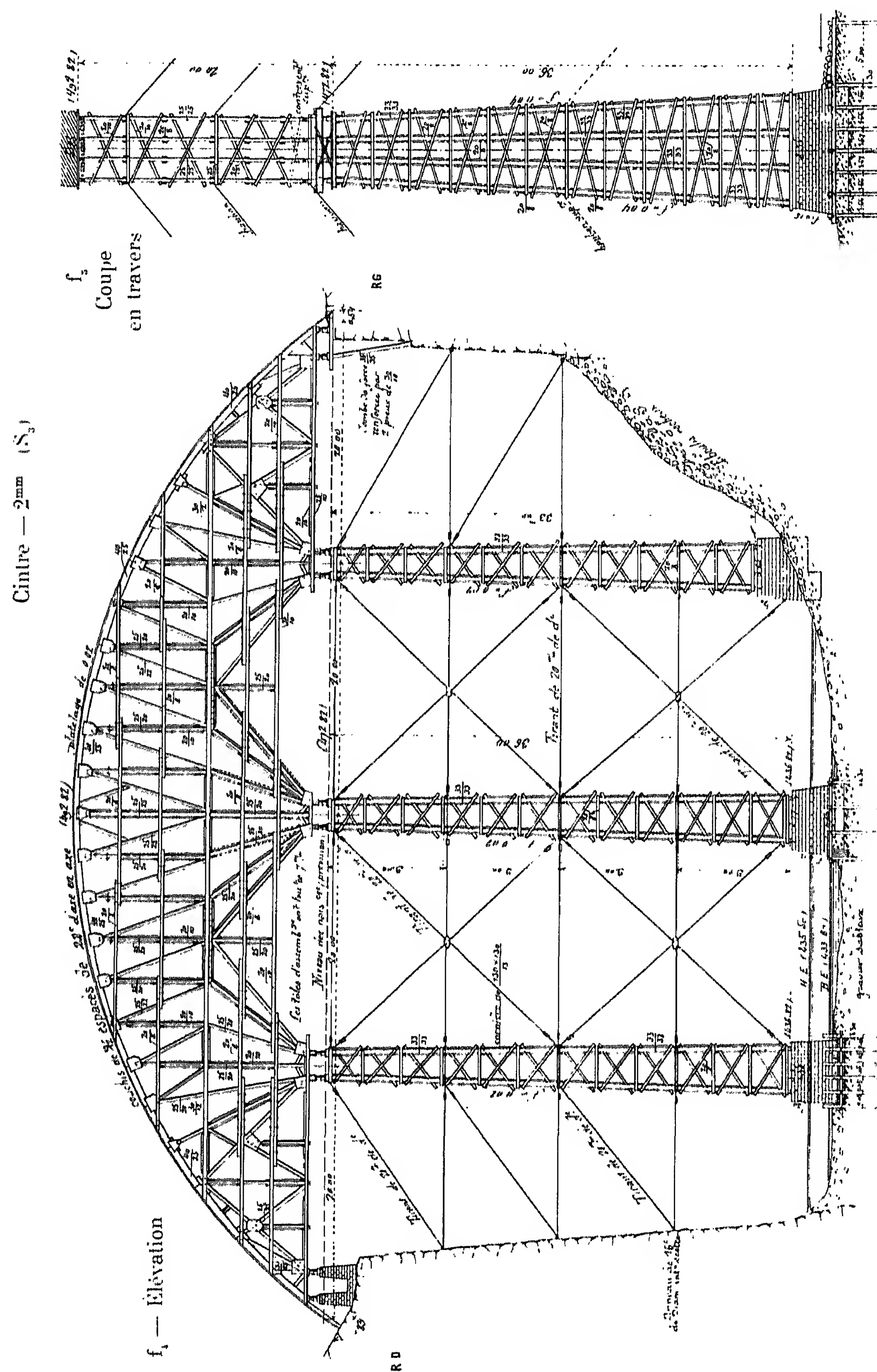
f_7 — Ensemble — $7^{mm}5$



f_8 — Détail — 3^{cm}

Le cintre était tenu par 8 haubans, munis de tendeurs, amarrés au rocher (f_5).

Dans les assemblages, les abouts des pièces étaient protégés par une tôle de 1^{mm} (S_3).



Cintre — 2mm (S3)
f1 — Élévation
f2 Coupe en travers
RD
RG

B. Calcul — Les pièces ont été calculées [3] pour supporter le poids du premier rouleau.

Voici les efforts maxima en $kg/\overline{0^m01}^2$ (S_3) :

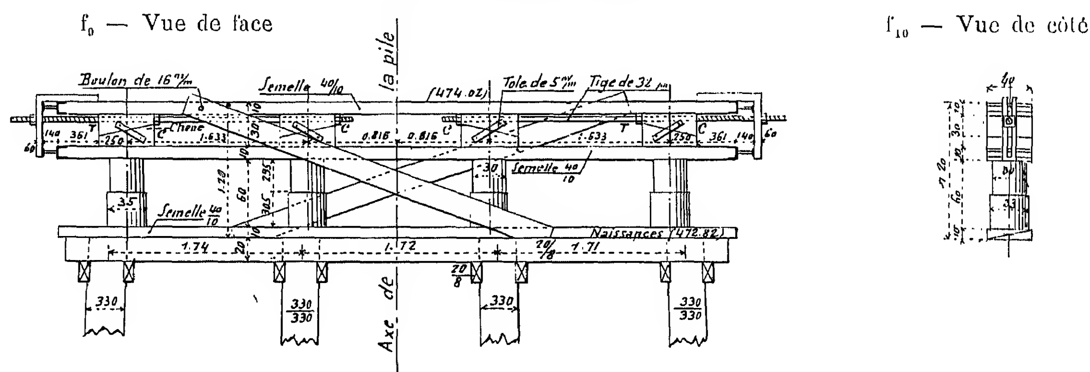
		Pour la charge du premier rouleau	Pour la charge de la voûte entière
Couchis		77^k	141^k
Vaux		66	138
Pièces de l'étage	supérieur	20	38
	inférieur	35	64
Piles (avec vent horizontal de 250^k par m.q. de surface verticale pressée)	poteaux, sans tenir compte des ferrures (S_3)	66	84
	moises	32	37
	croisillons	37	42

C. Appareils de décintrement. — *Boîtes à sable et coins.* — Le sable, grillé, était garanti de l'humidité par une corde goudronnée enroulée autour du piston, et par un chapeau en tôle (S_6).

Pour augmenter au-delà de 20^{cm} la course des boîtes à sable au décintrement, on avait disposé, au-dessus, les coins C, commandés par les tiges filetées T (f_9, f_{10}) : ils n'ont pas servi (S_3).

Appareil de décintrement — $1^{cm}5$

f_9 — Vue de face f_{10} — Vue de côté



D. Mise en place. — Le cintre a été mis en place en 110 jours, par 5 charpentiers, 5 manœuvres, 2 mécaniciens, 1 chef de chantier (S_5).

Un transporteur électrique à câble a monté le cintre, et plus tard transporté les matériaux [4].

4. Mouvements du cintre avant la construction de la voûte. —

En février 1909, avant qu'il eut été chargé des matériaux de la voûte, un ouragan le fit tourner autour de son appui rive gauche, sur les semelles des boîtes à sable, de 32^{cm} à l'appui rive droite, 15^{cm} à la pile rive droite, 5^{cm} à la pile centrale.

On le remit en place en tendant les haubans amont (S_5).

3. — avec les formules données aux Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1886, p. 503 et suivantes: « *Construction des ponts du Castelet, de Lavaur et Antoinette* », M. Séjourné (S_5).

4. — Il a fait alors au maximum, en 11 heures, 145 transports de 800^k.

5. Exécution de la grande voûte. — *A. - Division en rouleaux.* Elle a été construite en 3 rouleaux :

le premier comprenait toute la douelle ; le troisième tout l'extrados ; le second, seulement la deuxième rangée de moellons aux reins.

$Þ_2$ — Construction du 1er rouleau (S_4)

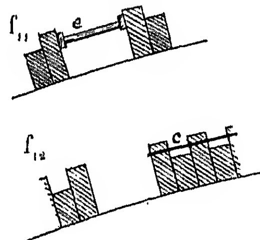


Dans tous les joints, arrosés (S_0), le mortier a été fiché, puis maté (S_3).

B. - 1er rouleau. — Les joints secs des retombées étaient maintenus à l'intrados par des liteaux en chêne de $10^{mm} \times 60^{mm}$; à l'extrados, par 14 cales en plomb de 14^{mm} d'épaisseur, longues de 35^{cm}, larges de 16^{cm} ; on bourrait l'intervalle entre ces cales avec de l'étoupe goudronnée (S_5).

Les libages de douelle se découpent, non seulement par assise, mais aussi dans la même assise ($Φ_2$). Il est alors difficile de bien poser, et surtout de bien maçonner le queutage (S_4).

Etais *e* et Câbles *c* soutenant les tronçons des reins pendant le clavage.



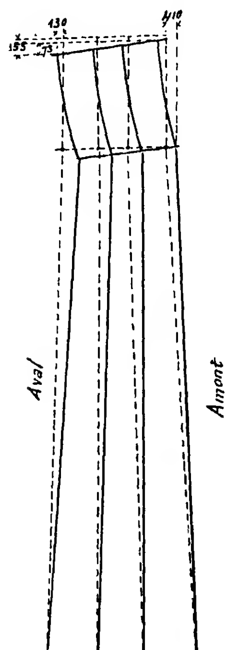
C. - Clavages (S_5). — On clava, des reins vers la clef, et on termina aux retombées.

Pendant le clavage aux reins, on soutenait les tronçons supérieurs par des étais *e* (f_{11}), ou on les retenait par des câbles *c* (f_{12}).

Le mortier était fiché, puis énergiquement maté à la spatule, à partir des têtes.

6. Mouvements du cintre pendant la construction de la voûte.

A. 1er *rouleau (23 juin – 25 juillet 1909)* (S_2). — Pendant le chargement et la construction du premier rouleau, le haut des piles du cintre s'inclina vers l'amont, le sommet du cintre vers l'aval (f_{13}).



f_{13} — Coupe en travers du cintre, le 27 juillet 1909

La voûte suivit. Le 23 juillet, sa tête aval avait une flèche en plan de 70mm (S''1).

On observa ce jour-là 4 très minces fissures aux reins, deux de chaque côté.

La plus importante « *avait l'épaisseur d'une fine « aiguille* » (S_2). On refouilla le joint, et on le remplit d'un coulis de ciment.

Les autres, à peine perceptibles, disparurent quelques jours après le clavage.

On ajouta au cintre des contreventements et des haubans, indiqués en pointillé sur f_4 et f_5.

On travailla jour et nuit pour claver promptement le premier rouleau.

Dès qu'il fut clavé, le mouvement en plan s'arrêta : la flèche de la tête aval était alors de 130mm (f_{13}).

B. 2e *rouleau (25 juillet – 11 août 1909).* — Pendant deux jours, les tassements continuèrent, un peu plus forts à l'aval qu'à l'amont.

Voici les tassements observés pendant la construction (S_2) :

Dates (1909)			Charge en tonnes	Tassement en mm de la clef à l'amont	Tassement en mm de la clef à l'aval	Différence de tassement aval amont
Mai	22	On commence à charger	0	0	0	0
	28		13t	6mm	4mm	2mm
Juin	2		40	9	13	4
	7	On charge le cerveau du cintre.	48	9	13	4
	15		170	17	21	4
	21		180	22	28	6
	23	On commence les maçonneries..	230	23	30	7
Juillet	15		705	36	45	9
	20	1er rouleau	810	42	63	21
	24			69	108	39
	25	matin, avant clavage	1296	70	132	62
		soir, après clavage		76	145	69
	27	2e rouleau		82	155	73
Août	21			82	155	73

7. Décintrement.

— On enleva le sable par hauteurs de 12mm. Le cintre se détacha vers 40mm.

On constata, avec l'appareil amplificateur Rabut, un tassement de 0mm2 à 0mm4 à la clef.[5]

8. Dates (S₅).

Fouilles	mai - juin 1908
Montage du cintre	1er sept. 1908 - 16 janvier 1909
Grande voûte — Construction	18 mai - 31 août 1909
Grande voûte — Décintrement	6 novembre 1909
Grande voûte — Rejointoiement	16 mai — 15 juillet 1910
Achèvement des travaux	fin septembre 1910

Le 21 janvier 1910, une crue extraordinaire, charriant des arbres, emporta le cintre. On remboursa 21.000f à l'entreprise.

9. Quantités et Dépenses (S₅).

	Quantités	Prix de revient — des fournitures — à l'unité	des fournitures — par nature de matériaux	des fournitures — par parties d'ouvrage	de la main-d'œuvre — par nature de matériaux	de la main-d'œuvre — par parties d'ouvrage	de l'ensemble
Travaux préparatoires (installation, outillage)				39.815f00		9.923f23	49.738f23
Grand et petits cintres — Fouilles, pilotis, maçonnerie			5.758f53		8.240f71		
Grand et petits cintres — Bois — Cintres	568mc42	60f	37.605f20		23.560f60		
Grand et petits cintres — Bois — Passerelle de service	70mc	50f					
Grand et petits cintres — Fers	42.595k	0f30 à 1f	23.375f87				
				66.739f60		31.801f31	98.540f91 [6]
Grande voûte — Pierre — Bandeaux	232mc830	68f	15.832f44				
Grande voûte — Pierre — Douelle et queutage	761mc175	55f	40.955f31				
Grande voûte — Pierre — Transport			8.302f12				
Grande voûte — Sable (trié et lavé)	130mc	1f	130f				
Grande voûte — 12 °/° de mortier — Ciment	77T7	52f	4.040f40				
Grande voûte — Divers			3.153f70				
				72.413f97		26.499f44	98.913f41
Maçonnerie et remplissage au-dessus de la grande voûte				43.366f74		19.842f83	63.209f57
Rejointoiements				1.382f		4.317f16	5.699f16
Garde-corps en fonte — Panneaux	~26.500k	0f35	9.275f				
Garde-corps en fonte — Accessoires			440f				
				9.715f		2.611f08	12.326f08
Murs de soutènement et abords				12.647f60		10.312f86	22.960f46
Travaux divers						3.562f15	3.562f15
Totaux				246.079f91		108.870f06	354.949f97 [7]

5. — Annales des Ponts et Chaussées, 1910-III, p. 191 à 193 : « *Notice sur les Travaux de construction du pont de Montanges* », par M. F. Lefort, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

6. — Les 11 cintres des 11 voûtes d'évidement, — faites ensemble pour gagner du temps, — ont été payés au prix du cintre de la grande voûte : 115f le mètre cube, en tout 5106f (S₅).

7. — Non compris 21.000f remboursés à l'entreprise pour perte du cintre.

10. Personnel (S_2).

Projet :

M. Picard, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées ;
M. Dor, Agent-Voyer en chef de l'Ain ;
M. Clermidy, Agent-Voyer principal.

Exécution :

M. Picard ;
M. Dor ;
M. Vallier, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

Entrepreneur : M. Petit, à Bellegarde.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et renseignements (S''_1) qu'a bien voulu me communiquer M. Vallier.

S_2. — Renseignements gracieusement donnés par M. Picard.

S_3. — L'Ingénieur-Constructeur, - 1910, - 15 mars, p. 129 à 143 ; 15 avril, p. 177 à 207, Pl. 1 : « *Pont du Moulin des Pierres, sur la Valserine* ». M. A. Reynaud, Chef de service à la construction du chemin de fer électrique de Bellegarde à Chézery.

S_4. — Ce que j'ai vu — juillet 1909.

S_5. — Annales des Ponts et Chaussées, 1911 - IV, p. 101 à 203, Pl. 11 à 14 : « *Notice sur* « *la construction du Pont de Montanges* », M. Picard, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

Cette notice était achevée avec les sources S_1 à S_4, quand a paru S_5, qui a permis de la compléter très utilement.

S_6. — L'Ingénieur-Constructeur, 15 octobre 1912, p. 485 à 516. « *Pont du Moulin des* « *Pierres, sur la Valserine* ». M. A. Reynaud (*Suite et fin de* S_3).

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS CONDUITE D'EAU

(AQUEDUCS)

Série $\widehat{\mathbf{A}}^{1}\mathrm{aq}_{(>40^{m})}$ [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4 :
1. — pour la définition des arcs « assez surbaissés ».
2. — pour le sens de ce symbole.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CONDUITE D'EAU

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE: *Longueur de l'ouvrage* Déclivité Hauteur maxima de l'ouvrage au-dessus du sol ou de l'étiage	ENSEMBLE: Largeur *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans	GRANDE VOÛTE — INTRADOS: Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS: Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES: Clef *Retombées*	MATÉRIAUX: *Mortier* *Poids, pour 1m³ de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/$\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Cabin-John** *États-Unis* 1857-1864 $\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ aq ($\geqslant$ 40^m)[1]	*137^m* » 27^m	*6^m 10* Pas de fruit	Arc de cercle 67^m,10 *17^m 47* $\frac{1}{3,84}$ = 0,260 *40^m 878*	1^m,27 sous la conduite d'eau 2^m,90 en dehors *6^m,10*	1^m,27 *1^m 88*	1er rouleau : *(voir col. 15)* Granit Lits de 3^{mm} 2e rouleau : Grès		1° 4 voûtes transversale cachées, en plein cint 2° »

1 Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, n° 6.

(AQUEDUCS) SÉRIE $\hat{A}^1$ aq ($\geqslant$ 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q
	GRANDE VOÛTE							DÉPENSE D
FONDATIONS	CINTRE				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] de volume « utile » W [4].
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01 [2] *Procédé*	FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES { Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	Cube de bois Poids de fer Dépenses par mq de douelle [2]		État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher	Fixe	4			2 rouleaux indépendants			
"	*Sapin*	"						
"		"						
On régularisa le rocher avec du béton	"							

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CONDUITE D'EAU (AQUEDUCS)

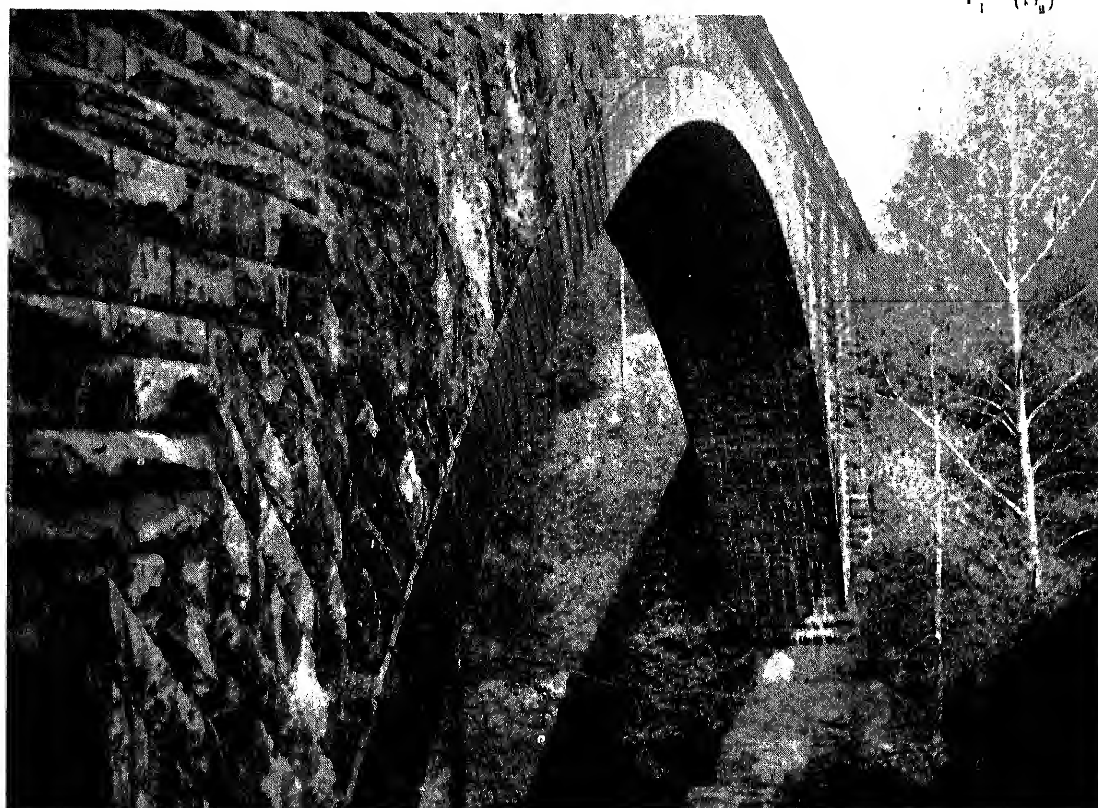
SÉRIE $\widehat{A}^{1}$ aq (> 40m)

MONOGRAPHIES

PONT DE CABIN-JOHN, SUR LE CABIN-JOHN CREEK, PRÈS DE WASHINGTON[1] *(ÉTATS-UNIS)*

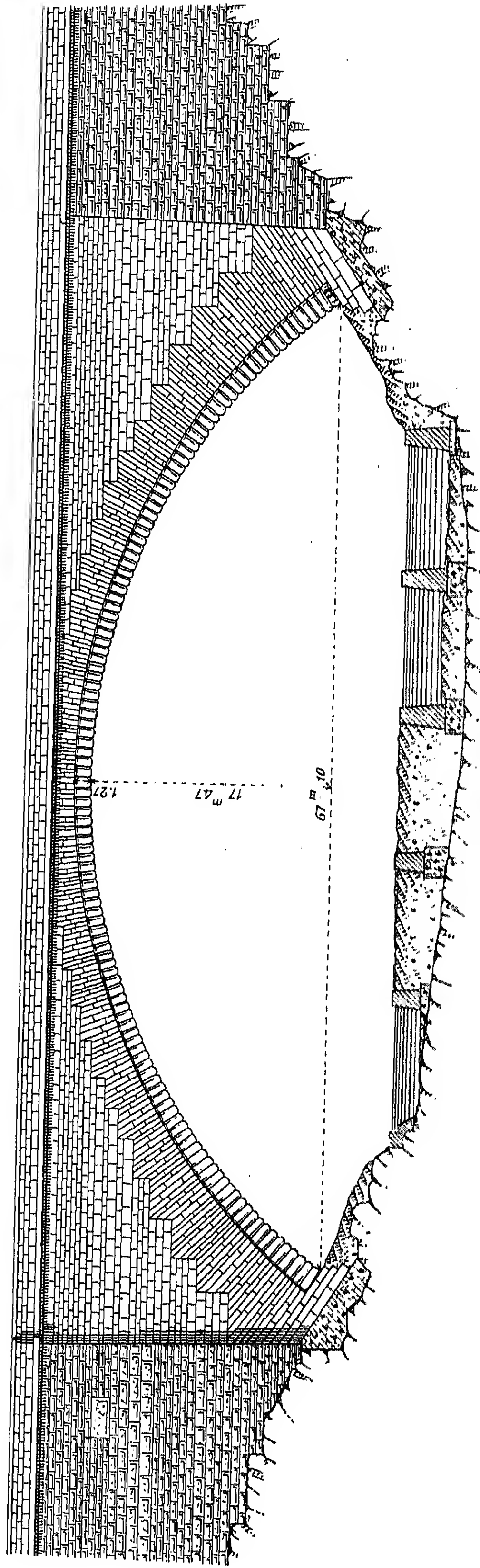
1857-1864 $\widehat{A}^{1}$ aq (> 40m) 1

Φ_1 (S_2)

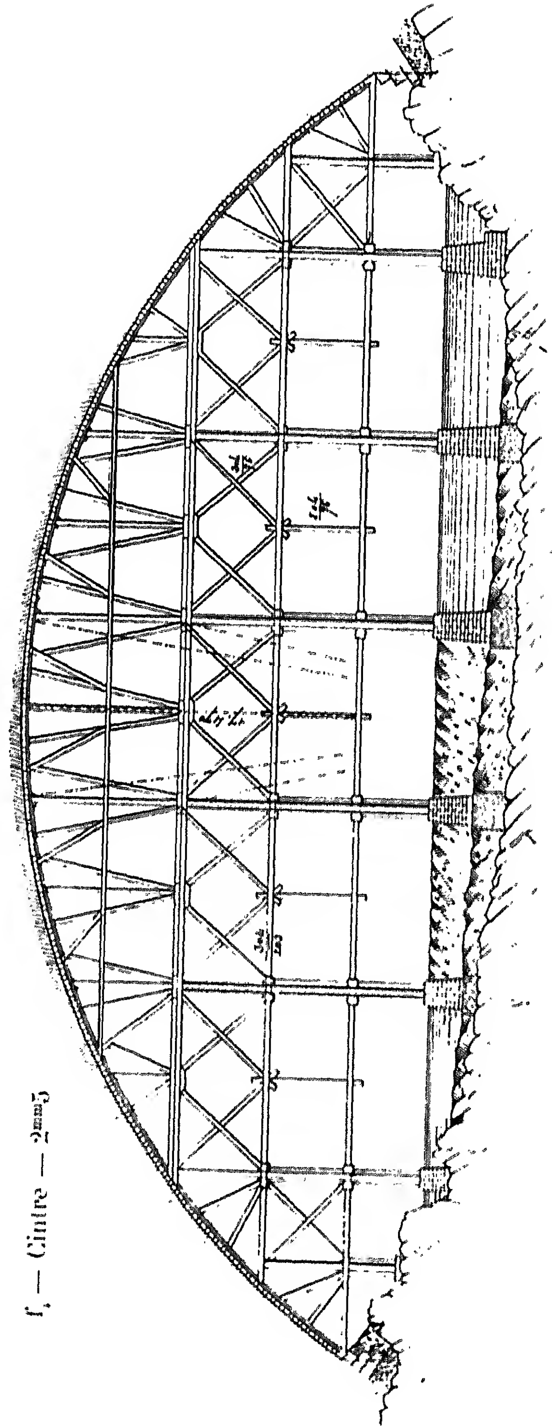


1. Conduite d'eau sur l'ouvrage. — Le pont porte une conduite circulaire (f_1), dans laquelle passe l'eau d'alimentation de Washington, prise au Potomac.

1. A 10km environ.



f_1 — Élévation — 2mm



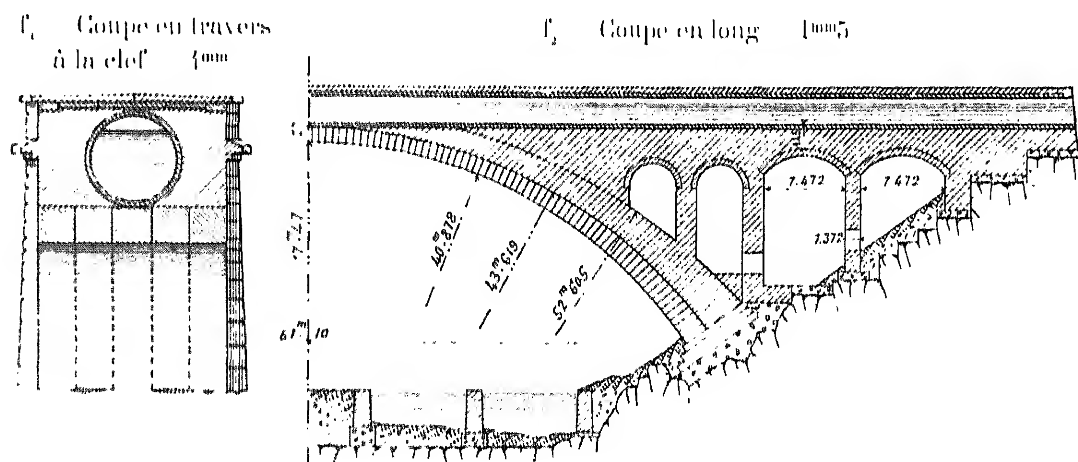
f_1 — Cintre — 2mm5

2. Voûte en deux rouleaux indépendants.

Le deuxième rouleau est échaneré au cerveau par la conduite d'eau, laquelle, à la clef, s'appuie sur le premier.

f_1 Coupe en travers à la clef 4mm

f_2 Coupe en long 1mm5



3. Fondations. — On a régularisé la surface du rocher avec du béton, sur lequel on a placé un large sommier fait de 3 assises de granit.

4. Décintrement. — La voûte, achevée en hiver, se détacha d'elle-même du cintre, l'été suivant.[2]

5. Ingénieur. — Général Meigs.[3]

2. Zentralblatt der Bauverwaltung, 5, 8, 19 septembre 1906, p. 455 à 458, 462 à 465, 483 à 486 : « *Fortschritte im Bau weitgesprengter flacher massiver Brücken, vom Landesbaurat Leibbrand in* » *Sigmaringen* ».

3. Renseignement gracieusement communiqué par M. Malverd A. Howe, Directeur du « Rose Polytechnic Institute » à Terre Haute (Indiana).

SOURCES :

S_1. Collection des dessins distribués aux Élèves de l'École des Ponts et Chaussées, Série 3, section A, Pl. 9 et 10 : « *Pont de Cabin-John* ». — Légendes explicatives des Planches, Tome II, p. 27 et 28.

S_2. Ce que j'ai vu — mai 1905.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série $\widehat{A}^{1} F^{r}_{(\geq 40^{m})}$ [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4 :
1 pour la définition des arcs « assez surbaissés »,
2 pour le sens de ce symbole.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	ENSEMBLE Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1m³ de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg/0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENT DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Maretta** $\widehat{\mathrm{A}}^1\ \mathrm{F^r}\ (\geqslant 40^m)\,1$ de **Prarolo** $\widehat{\mathrm{A}}^1\ \mathrm{F^r}\ (\geqslant 40^m)\,2$ *Italie* 1851-1852	*77m* 8mm 28m	8m00 » Fruit $\frac{1}{20}$ 1m20	Arc de cercle aux têtes : **42m,92** sur l'axe : **40m,00** *10m 00* $\frac{1}{4}$ = 0,25 *25m*	1m,80 *3m 10*	1m,80 »	Briques s'écrasant à 54k71 (paraissant bien conservées) Dimensions : Longueur 26cm Largeur 13cm Épaisseur : 6c5, 6c7, 7c Briques spéciales en douelle Lits de mortier de 6mm au plus	Pression maxima à la clef : 12k51 *Méry* 9000k par m. ct	1° Pas d'évidement 2° »
d' **Isola del Cantone** (Pont en amont et Pont en aval) *Italie* 1852 $\widehat{\mathrm{A}}^1\ \mathrm{F^r}\ (\geqslant 40^m)\,3$ et 4			**40m,00** » »			Briques		
de **Calcio** *Italie* 1877-1878 $\widehat{\mathrm{A}}^1\ \mathrm{F^r}\ (\geqslant 40^m)\,5$	*121m 77* 6mm 15m75 fond du lit	8m00 *7m 50* Pas de fruit 0m60	Arc de cercle **42m,00** *11m 90* $\frac{1}{3{,}529}$ = 0,283 *24m 479*	1m,40 *2m 38* 14 ressauts de 11cm à l'extrados	1m,00 *1m 60*	Briques rouges de Crémone s'écrasant à 335k Dimensions : 28c × 13c × 6c5 *Chaux hydraulique de Palazzolo — 150k*	Pression maxima : Clef : 12k Retombées : 23k » 8000k par m. ct	1° Pas d'évidement 2° *Bandeaux : 8 assises en saillie, puis en retraite. Cadres dans les tympans. Angles des pilastres à gros bossages*
du **Gour-Noir** *France* 1888-1889 $\widehat{\mathrm{A}}^1\ \mathrm{F^r}\ (\geqslant 40^m)\,6$	*108m 46* 9mm RD RG 20m20	8m00 *8m 60* Fruit $\frac{1}{20}$ 1m06	Arc de cercle au niveau des fondations : **62m,00** aux retombées : **60m,00** *16m 10* $\frac{1}{3{,}726}$ 0,268 *36m*	1m,70 *4m 20*	1m,70 *3m 70 à 5m*	Bandeaux et Douelle : PT[1] Bossages de 25 à 30 Queutage : MEV[1] Granit de Cabirol L'archivolte est en granit de Lonzac *Au-dessus de 18·16 :* *Ciment artificiel Vicat nº 1 650k* *Au dessous :* *Ciment 800k*	A la clef : Pression : max. 33k2 moy. 16k6 *Méry* »	1° 6 voûtes transversales vues, en plein cintre de 4m30, sur piles de 0m95 2° *Archivolte*

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, nº 6.

A VOIE NORMALE SÉRIE $\hat{A}^1$ F^r ($\geq 40^m$)

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION — FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé* 10	GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement 11	FERMES Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement* 12	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux 13	Cube de bois Poids de fer Dépenses par mq de douelle[2] 14	MODE DE CONSTRUCTION 15	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date 16	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v 17	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p[3] { de volume « utile » W[4] 18
Marella *Roc vif* 3m Prarolo rive : *Roc* rive : *Argile compressible* *Grillage en chêne et grand empâtement*	*Le même cintre a servi pour les 2 ponts.* Retroussé sur 40m Type Pont de Neuilly *Chêne* *Moises horizontales en mélèze* »	7 *1 de rive 40c* *4 intern. 30c* 1m50 *250mm*	Chêne 111mc7 Mélèze 36mc5 Bois 148mc2 Fers 720k Dép. 26400f (pour chaque pont)	 1mc2 1k9 71f		Marella » » 14 février Prarolo Voûte nue » » A l'un des ponts : » *30 jours* » A l'autre : » *60 jours* »	 t_c 180mm t'_v 15mm » t'_v 80mm » t'_v 35mm » t'_v 50mm	Marella Q 17078mc Q : S_p = 27mc72 Q : W = 1mc10 D 450502f D : S_p 731f3 D : W = 27f2 D : Q = 26f4 Prarolo — un peu moins cher.
Gravier calcaire 4m20 sous les eaux moyennes » *Béton dans une enceinte de pieux jointifs et palplanches à la partie supérieure*	Fixe Boîtes à sable	7 *30cm* » *150mm*	118mc 5675k 33958f	1mc08 14k6 87f4		» *32 jours* »	t_c 80mm t'_v + t''_v (2 j.rs) 48mm	D 300000 Lires environ D : S_p 307f9 D : W = 27f5
Granit dur 4m35 en moyenne Pression maxima : 9k8	Fixe Type Pont de Lavaur $\hat{A}^1$ F^r 40m,1[5] (Tome II) *Sapin du Jura* *Pieux en chêne* Boîtes à sable	7 *2,5m* 1m50 *30mm*	515mc 20695k 57360f	0mc71 28k6 79f2	A partir de 48° 16' de la clef: 3 rouleaux. Au 1er roul. : 8 tronçons, 21 clavages. Aux 2e et 3e roul. : 8 tronçons, 5 clavages.	Cerveau de la voûte (sur 88°) chargé de 175mc de moellons *52 jours* 28 septembre	t_c 14mm t'_v Clef : 1mm3 A 15° : 0mm8 A 35° : 0mm3	Q 6717mc Q : S_p 7mc69 Q : W 0mc45 D 334331f D : S_p 383f2 D : W 22f3 D : Q 49f8

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) : C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole 1	PROJET — GRANDE VOÛTE — ENSEMBLE: *Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage 2	ENSEMBLE: Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados 3	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon* 4	ÉPAISSEURS: CORPS Clef *Retombées* 5	ÉPAISSEURS: TÊTES Clef *Retombées* 6	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1m³ de sable, de chaux ou de ciment* 7	PRESSIONS en kg (0m01)² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMEN[T] DES TYMPAN[S] 2° *DÉCORATIO[N] DES TÊTE[S]* 9
de **Pouch** *France* 1890 Â¹ Fr (≥ 40m)7	*56m 03* 10mm 15m 42	8m 90 (voie en courbe de 600m de rayon) *8m 30* Fruit : 1/33 0m92	Arc de cercle **47m,85** *13m 00* 1/3,68 0,272 *28m 51*	**1m,50** *2m,627*	**1m,50** *2m 627*	Bandeaux et Douelle : PT ¹ Queutage : MEV ¹ Granit *Chaux du Teil 350k*		1° 4 voûte[s] transvers[ales] vues, en plein cin[tre] de 4m90 sur pile[s] de 1m 1[...] 2° »
de **Freyssinet** *France* 1890–1891 Â¹ Fr (≥ 40m)8	*51m 79* 10mm 13m16	8m 25 *7m 65* Fruit : 1/33 0m92	Arc de cercle **45m,00** *11m 00* 1/4,09 0,245 *28m 51*	**1m,50** *2m 15*	**1m,50** *2m 15*	Bandeaux et Douelle : PT ¹ Queutage : MEV ¹ Granit *Ciment de Boulogne 500k*		1° 4 voûte[s] transvers[ales] vues en plein ci[ntre] de 4m5[...] sur pil[es] de 1m[...] 2° »
de **Jaremcze** *Autriche* 1893–1894 Â¹ Fr (≥ 40m)9	*185m* 11mm 27m	4m 50 *4m 50* Fruit : 1/20 1m40	Arc de cercle **65m,00** *17m 90* 1/3,63 0,275 *38m 451*	**2m,10** *3m 10*	**2m,10** *3m 10*	PT ¹ Grès (480k à 1180k) Aux voussoirs du queutage, on acceptait un démaigrissement de 1/8 de la surface de lit. *Ciment Portland de Szczakowa (Galicie) 0m 285* Joints de 18mm au moins	Pression maxima (sans surcharge) 27k 5 *Arc élastique* »	1° 8 voû[tes] transver[sales] vues en plein c[intre] de 3m[...] 2° »
de **Jamna** *Autriche* 1893–1894 Â¹ Fr (≥ 40m)10	*121m 80* 11mm 19m 19	4m 50 » Fruit : 1/20 1m45	Arc de cercle **48m,00** *12m 00* 1/4 0,25 *30m*	**1m,70** *2m 60*	**1m,70** *2m 60*	PT ¹ Grès En douelle, mêmes épaisseurs d'assises qu'aux bandeaux Aux voussoirs du queutage, on acceptait un démaigrissement de 1/8 de la surface de lit. *Ciment 0m 285*	Pression maxima (sans surcharge) 25k 1 *Arc élastique* »	1° 6 vou[tes] transve[rsales] vue[s] en plein [cintre] de 3[...] 2° »
de **Worochta** *Autriche* 1893–1894 Â¹ Fr (≥ 40m)11	» 12mm 16m20	4m 50 » Fruit : 1/20 »	Arc de cercle **40m,00** *10m 00* 1/4 0,25 *25m*	**1m,40** *2m 20*	**1m,40** *2m 20*	PT ¹ Grès En douelle, mêmes épaisseurs d'assises qu'aux bandeaux Aux voussoirs du queutage, on acceptait un démaigrissement de 1/8 de la surface de lit *Ciment 0m 285*	Pression maxima (sans surcharge) 21k 4 *Arc élastique* »	1° 6 vo[ûtes] transve[rsales] vu[es] en plein [cintre] de [...] 2[°]

1. Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé* 10	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement 11	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement* 12	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux 13	par mq de douelle [2] 14	MODE DE CONSTRUCTION 15	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier chargement et le décintrement* Date 16	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v 17	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4] 18
Rocher très résistant 1m à 2m50 " *Rocher taillé suivant le dernier lit. Surface régularisée au béton de ciment.*	Fixe Type Pont Antoinette Â¹ Fr (> 40m)⁵ (tome II) " Boîtes à sable	6 *2,5m* 1m68 "			3 rouleaux. Aux 1er et 2e roul.: 8 tronçons. au 3e rouleau: 4 tronçons.	" *55 jours* 4 août	t'_v 2mm2	Q = 4393mc Q : S_p = 8mc30 Q : W = 0mc63 **D = 143866f** D : S_p = 288f4 D : W = 20f6 D : Q = 32f8
Rocher très résistant 1m à 2m50 " "	*On a remployé le cintre du Pont de Pouch* Â¹ Fr (> 40m)⁷				2 rouleaux. A chaque rouleau, 8 tronçons.	" *137 jours* 6 avril		Q = 4336mc Q : S_p = 10mc03 Q : W = 0mc82 **D = 137418f** D : S_p = 317f9 D : W = 26f1 D : Q = 31f7
Rocher grès " " *A sec*	Fixe " Coins	3 " " *120mm*			3 rouleaux. Au 1er rouleau: 8 tronçons. Aux 3 rouleaux, moellons posés à sec, puis joints matés.	Tympans achevés " Août	t_c 115mm $t'_v + t''_v$ 60mm	
Rocher	Fixe	*120mm*			2 rouleaux. Au 1er rouleau: 6 tronçons	Tympans achevés	t_c 105mm	
Rocher Grès					A pleine épaisseur.			

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole	PROJET — GRANDE VOÛTE — ENSEMBLE: *Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs {entre parapets / *entre tympans sous la plinthe*} Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1 m³ de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^m01^2}$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEME[NTS] DES TYMPA[NS] 2° *DÉCORAT[ION] DES TÊT[ES]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
sur la **Gutach** *Allemagne* 1899–1900 $\hat{A}^1$ Fr (⩾ 40m) 12	*140m82* 0 34m	{5m00 / *4m20*} Fruit : 1/30 1m15	Arc de cercle **64m00** *16m10* $\frac{1}{3,974}$ = 0,251 *39m851*	**2m00** *2m80*	**2m00** *2m80*	PT[1] Grès des Vosges (Saverne) (400k à 600k) *Ciment Portland Schifferdecker 0m.333* *Sable de la Gutach*		1° 8 voût[es] transvers[ales] vues, en plein c[intre] de 4m, sur pil[es] de 1m[…] 1m20, 1[…] 2° »
sur le **Schwändeholzdobel** *Allemagne* 1899–1900 $\hat{A}^1$ Fr (⩾ 40m) 13	*118m93* 7mm 42m	5m20 (voie en courbe de 800m de rayon) *4m40* Fruit : 1/30 1m20	Arc de cercle **57m00** *14m25* $\frac{1}{4}$ = 0,25 *35m625*	**1m80** *2m60*	**1m80** *2m60*	PT[1] Grès poreux, gelt. On refusa beaucoup de voussoirs *Ciment Portland Schifferdecker 0m.333*		1° 8 voût[es] transvers[ales] vues, en plein c[intre] de 3m[…] sur pil[es] de 1m[…] 1m20, 1[…] 2° »
Chemnitz *Allemagne* 1901–1902 $\hat{A}^1$ Fr (⩾ 40m) 14	*116m* 10mm9 10m25	{» / *2m70*} Fruit : 1/10 »	Arc d'anse de panier **45m00** *8m60* $\frac{1}{5,23}$ = 0,191 *Rayon au cerveau : 42m50*	**1m00** »		Petits moellons Aux têtes, crépi jouant la pierre de taille (Granit) »		
sur la **Diveria** *Italie* 1901–1902 $\hat{A}^1$ Fr (⩾ 40m) 15	» 22mm6 18m	{» / *8m20*} Fruit : 1/20 0m79	Arc de cercle **40m00** *10m00* $\frac{1}{4}$ = 0,25 *25m*	**1m40** *2m10* 14 ressauts à l'extrados	**1m40** *1m10*	Briques de Novare, pressées (450k) *Chaux hydraulique de Palazzolo 400k*		1° Pas d'éviden[…] 2° »
sur le **Strandeelven** *Norvège* 1902–1904 $\hat{A}^1$ Fr (⩾ 40m) 16	*58m70* 15mm 19m (sol)	{4m70 / *4m80*} Fruit : 1/20 1m35	Arc d'anse de panier à 3 centres **41m00** *11m25* $\frac{1}{3,645}$ = 0,274 *Rayons : Cerveau : 26m* *Reins : 21m75*	**1m50** *2m40*	**1m30** *2m10*	PT[1] grossière Gneiss (1000k à 2700k) Sur les reins, MOH[1] à ciment *Sable 3 parties* *Ciment 1 partie* *Joints de 25mm* *11 0/0 de mortier*	Pression maxima : Clef : 20k Retombées : 35k » 15 tonnes par m.l.	1° Pa[s] d'évide[…] 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

[…] Mesurée sur un dessin

A VOIE NORMALE SÉRIE $\hat{A}^1$ Fr (... 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE (*Suite*)

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé* 10	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement 11	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement* 12	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux 13	par mq de douelle [2] 14	MODE DE CONSTRUCTION 15	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date 16	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_o au décintrement t'_v après t''_v 17	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4] 18
Granit ferme " " "	Fixe Type Pont de Lavaur $\hat{A}^1$ F [illegible] (Tome II) " Boîtes à sable	5 " 1m20 *120mm*	Cintre et Pont de service ensemble 1000me " 140000f dont, pour montage et démontage 51250f		2 rouleaux Au 1er rouleau, 6 tronçons Tous les voussoirs posés à sec	Voûtes d'évidement clavées " 9 juin	t_c 89mm t'_v 21mm t''_v (247 jrs) 58mm	Q = 4754me Q : S_p = 6me75 Q : W' = 0me35 D = 396114f D : S_p = 562f6 D : W = 28f5 D : Q = 83f3
Granit très fissuré (vallée Neustadt)	Fixe Type Pont de Lavaur $\hat{A}^1$ F [illegible] (Tome II) " Boîtes à sable	5 " 1m20 *120mm*	Cintre et Pont de service ensemble " " 103750f dont, pour montage et démontage 44775f		2 rouleaux	Voûtes d'évidement clavées *12 jours* 13 juillet	t_c 99mm t'_v 21mm t''_v (215 jrs) 80mm	Q = 4000me Q : S_p 6me46 Q : W' 0me32 D = 319791f D : S_p 517f1 D : W' 29f1 D : Q 79f9
Gravier								Q 3700me D 150548f
	Fixe [illegible] " Boîtes à sable	7 *2,5cm* 1m37	355me " "	0me93 " "	Plusieurs attaques	" *15 jours* "	t_c 30mm t'_v 60mm	D 284 000 Lires
Rocher	Fixe Boîtes à sable	5 *Bois ronds* Fermes de rive 1m25 Fermes interm. 1m15	" " 14582f	" " 49f1	2 rouleaux Joints matés	" *357 jours* 14 septembre	t_c 42mm t'_v 1mm5	Q 2150me Q : S_p 8me51 Q : W' 0me56 D 121103f D : S_p 479f8 D : W' 31f9 D : Q 56f3

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, nº 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets. Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, nº 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs { entre parapets / *entre tympans* *sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1 m³ de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg 0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
sur le **Krenngraben** *Autriche* 1904-1905 Â[1] F^{r} (≥ 40^{m}) 17	*62^{m}* 14^{mm}7 28^{m}	4^{m}94 (voie en courbe de 320^{m} de rayon) *5^{m}01* Fruit : 1/20 1^{m}10	Arc de cercle 40^{m},00 *10^{m}00* 1/4 0,25 *25^{m}00*	1^{m},50 *2^{m}30*	1^{m},50 *2^{m}30*	Bandeaux et Douelle : MEV[1] Calcaire dur Aux têtes, bossages et ciselures Queutage : MOV[1] Granit *Ciment 150^{k}*	Pression maxima : 25^{k} Surcharge : Machines / Tenders / Wagons Poids en 1 : 80^{T} / 30^{T} / 22^{T} Long^{r} entre tampons : 10^{m}6 / 6^{m} / 6^{m} Essieux Nombre : 5 / 3 / 2 Ecartement : 1^{m}4 / 1^{m}5 / 3^{m} Poids : 16^{T} / 13^{T} / 11^{T} *Circulaire du Ministère des Chemins de fer 25 août 1904*	1° 6 voûtes transversales vues, en plein cintre, de 2^{m}50, sur piles de 1^{m}20 2° »
sur la **Steyrling** *Autriche* 1904-1905 Â[1] F^{r} (≥ 40^{m}) 18	*101^{m}80* 2^{mm}3 46^{m}	4^{m}75 *4^{m}50* Fruit : 1/20 1^{m}50	Arc de cercle 70^{m},00 *15^{m}70* 1/4,45 0,225 *46^{m}86*	2^{m},00 *3^{m}10*	2^{m},00 *3^{m}10*	PT[1] Granit En douelle, mêmes épaisseurs d'assises qu'aux bandeaux *Ciment Portland 0^{m3}333*	Pression maxima : 37^{k} Surcharge : Comme au Pont sur le Krenngraben Â[1] F^{r} (≥ 40^{m}) 17	1° 10 voûtes transversales vues, en plein cintre, de 3^{m}25, sur piles de 1^{m}25 à 1^{m}[illegible] 2° »
de **Salcano** *Autriche* 1904-1906 Â[1] F^{r} (≥ 40^{m}) 19	*219^{m}70* 3^{mm} RG RD 37^{m}	5^{m}50 [6] *5^{m}60* *au niveau de la voie* Fruit : 1/20 0^{m}87	Arc de cercle 85^{m},00 *21^{m}80* 1/3,898 0,257 *52^{m}33*	2^{m},10 *3^{m}50*	2^{m},10 *3^{m}50*	PT[1] (0^{m3}2 à 0^{m3}7) Calcaire de Nabresina (1200^{k} en cubes de 6^{cm}) La [illegible] taillés *Ciment Portland 1re classe de Spalato 0^{m3}333* *Sable de l'Isonzo lavé* *Joints de 16^{mm}*	Pression maxima : Clef : 28^{k} Joint de rupture : 51^{k} Retombées : 40^{k} *Arc élastique* Surcharge : Comme au Pont sur le Krenngraben Â[1] F^{r} (≥ 40^{m}) 17	1° 10 voûtes transversales vues, en plein cintre, de 3^{m}40 à 5^{m}, sur piles de 1^{m}35 à 1^{m}[illegible] 2° »
de **Svenkerud** *Norvège* 1905-1907 Â[1] F^{r} (≥ 40^{m}) 20	*90^{m}* 0 16^{m}50 Basses eaux 31^{m} Fond du lit	4^{m}70 *4^{m}80* Fruit : 1/20 1^{m}10 jusqu'au dessus de la plinthe	Arc d'anse de panier à 3 centres 44^{m},00 *6^{m}60* 1/6,66 0,15 *Rayons : Cerveau : 44^{m} Reins : 30^{m}80*	1^{m},60 *2^{m}50*	1^{m},60 *2^{m}50*	PT[1] grossière Grès (900^{k} à 1500^{k}) Sur les reins, MOH[1] à ciment *Sable : 2,5 parties* *Ciment : 1 partie* *23 % de mortier*	Pression maxima : Clef : 30^{k}3 Joint de rupture : 35^{k}8 Retombées : 28^{k}1 » 15^{tonnes} par m.^{el}	1° Pas d'évidements 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

6. Mesurée [illegible] au-dessus [illegible]

A VOIE NORMALE — SÉRIE $\widehat{A}^1$ Fer ($\geq 40^m$)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

EXÉCUTION — FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0^m01^2 *Procédé*	GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	Cube de bois Poids de fer Dépenses par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Éboulis peu compacts (Conglomérat) » Pression maxima : 3k5 *Plate-forme en béton, armé d'un grillage en* I *croisés*	Fixe » Billots à base évidée Zuffer	5 *Étage supérieur 20cm* *Au-dessous, bois ronds de 20c à 25c* 1m60 *100mm*	» » 13125f	» » 49f5		Voûte nue » 8 mai	t'_v 2mm	
Éboulis très compacts » Pression maxima : 7k5 *A sec* *Plate-forme en béton à 1/12, armé de fers ronds*	Fixe » Billots à base évidée Zuffer	5 *30c × 12c* 1m50 *250mm*	866mc » 42000f	1mc72 » 83f3	3 rouleaux Même mode de construction qu'au Pont de Saleano $\widehat{A}^1$ Fer (40m)[19]	Piles sur la grande voûte achevées jusqu'aux retombées des voûtes d'évidement » Été	t_c 130mm t'_v 9mm	Q 4595mc Q : S_p 9mc52 Q : W 0mc33 Fondations / Élévation / Ensemble D 42000f / 525000f / 567000f D : S_p 86f9 / 1085f7 / 1172f6 D : W 3f0 / 37f5 / 40f5 D : Q » / » / 123f4
Rive gauche : *Conglomérat caverneux.* Rive droite : *Éboulis.* Pression moyenne : 4k *Plates-formes en béton armé de 2m20 d'épaisseur*	Fixe *Pin* Billots à base évidée Zuffer	7 *Étage supérieur 20c à 28c* *Étag. interm. 20c à 25c* *Étage infér. 21c à 32c* 1m30 *220mm*	1209mc 100000k 287910f dont, pour la pile en rivière 142590f	1mc51 12k5 359f9	5 assises à pleine épaisseur, puis, 3 rouleaux Au 1er roul. 8 tronçons.	Piles sur la grande voûte achevées jusqu'aux retombées des voûtes d'évidement *38 jours* 8 août	t_c 40mm aux reins : 60mm t'_v 6mm	Ouvrage entier / Grand pont et pilastres Q 14300mc / 9420mc Q : S_p 11mc8 / 15mc4 Q : W 0mc40 / 0mc43 D 1137360f / 975030f D : S_p 941f5 / 1598f4 D : W 39f32 / 50f22 D : Q 79f5 / 103f5
Rocher » » *A sec*	Retroussé sur 43m Arc à treillis en bois et métal, à 2 articulations » Boîtes à sable	5 » Fermes de rive 1m20 Fermes intermédiaires 1m00 »	» » 22000f	» » 84f	3 rouleaux Joints matés	Tympans achevés *108 jours* 2 mai	t_c 49mm t'_v 5mm5 à 7mm	Q = 1800mc Q : S_p = 4mc65 Q : W = 0mc26 D = 148 300f D : S_p 383f2 D : W = 22f4 D : Q = 82f4

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) = C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE Longueur *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1me de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg : 0^m01^2 *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Langenbrand** *Allemagne* 1907-1909 Â[1] Fr (> 40m)21	*150m* 22mm 25m	4m 70 *1m 20* Fruit 1/30 1m20	Arc de cercle **59m,00** *14m 75* $\frac{1}{4}$ = 0,25 *36m 878*	**1m,80** *2m 60*	**1m,80** *2m 60*	PT[1] Granit *Ciment 160k (Ir, 3r)* *Joints de 2cm*	Pression maxima : avec surch. / sans surch. Clef 30k5 / 21k5 Joint de rupt. 41k1 / 27k3 Retomb. 39k4 / 26k3	1° 8 voûtes transversales vues, en plein cintre de 3m90, sur piles de 1m00 à 1m35 2° »
de **Lusserat** *France* 1908-1910 Â[1] Fr (≥ 40m)22	*84m28* 10mm 14m25	8m 08 *8m 10* Pas de fruit 0m99	Arc de cercle **45m,70** *9m 87* $\frac{1}{4,63}$ = 0,216 *31m 39*	**1m,45** *2m,80*	**1m,45** *2m 80*	Bandeaux : PT[1] Douelle : MAV[1] Queutage : MOV[1] *Ciment Portland de Boulogne 150k* *Joints : dans une même assise 3cm entre 2 assises 1 à 3cm*	Pressions : max. / moy. Clef 28k / 18k A 11m de la clef 25k / 15k Retomb. 12k / 10k *Arc élastique* *Méthode analytique de M. Résal* 1150k m²	1° Pas d'évidement 2° *Archivolte.*
de **Boïlefos** *Norvège* 1908-19.. Â[1] Fr (≥ 40m)23	*71m* 11mm1 18m50	4m 85 (voie en courbe de 250m) *4m 25* Fruit : 1/20 0m95	Arc d'anse de panier à 3 centres **40m,00** *10m 00* $\frac{1}{4}$ = 0,25 *Rayons :* *Cerveau : 28m50* *Reins : 21m678*	**1m,40** *2m,30*	**1m,40** *2m 30*	PT[1] grossière Gneiss (1100k à 2100k) Sur les reins, MOH[1] à ciment *Ciment*	Pression maxima : Clef : 20k Joint de rupture : 30k8 Retombées : 27k » Surcharge : 15T par md	1° Pas d'évidement 2° »
de **Lichtensteig** *Suisse* 1907-1909 Â[1] Fr (≥ 40m)24	*98m 50* 0 15m40	7m,40 1 voie : 5m40 1 passage pour piétons : 2m00 *5m 20* Pas de fruit 2m00	Arc de cercle **42m,82** *11m 544* $\frac{1}{3,709}$ = 0,269 *25m 619*	**1m,40** *2m,70*	**1m,40** *2m 70*	MEV[1] Grès calcaire, assisé *Ciment Portland 0m3 333*	Pression maxima sans surcharge : Clef : 19k8 avec surcharge : Clef : 27k5 Joint de rupture : 28k9 Retombées : 23k2 *Arc élastique* *Méthode graphique Ritter* 1800k, m²	1° 8 voûtes transversales vues, en plein cintre de 3m50, sur piles de 1m à 1m25 2° *Clef et Contre-clefs en libages*

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

TABLEAU SYNOPTIQUE (*Suite*)

EXÉCUTION FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé* 10	GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement 11	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement* 12	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux 13	par mq de douelle [2] 14	MODE DE CONSTRUCTION 15	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date 16	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v 17	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]. 18
Granit » Pression maxima : avec surcharge : 5k6 sans surcharge : 5k »	Fixe » Vérins à vis	4 *Étage supérieur* 25c *Étage inférieur* 40c 1m50 *150mm*	270mc 5090k 17893f	0mc74 13k9 48f8	2 rouleaux 6 attaques Voussoirs du 1er rouleau posés à sec, puis, après fermeture de la voûte, remplis de mortier à 1:3	Voûte nue *56 jours* 8 février	t_c 52mm $t'_v + t''_v$ 7mm	Q = 4 120mc Q : S_p = 5mc84 Q : W = 0mc24 — Fondations / Élévation / Ensemble D : 16536f / 291964f / 308500f D : S_p : 23f2 / 414f4 / 437f6 D : W : 1f3 / 22f8 / 24f1 D : Q : » / » / 74f9
Calcaire tendre (Tuffeau) Rive droite -12m80 *Air comprimé* Rive gauche *Épuisements* Pressions : avec surcharge : MAXIMA : 10k moyenne : 6k4	Retroussé sur 10m (passe marinière) » Boites à sable	6 25cm 1m40 *10mm*	au dessus / au dessous des boites à sable 184mc / 298mc 8T / 4T9 19791f / 35619f Ensemble 483mc 12T9 55410f	1mc22 32k4 139f5	3 rouleaux Au 1er roul. : 13 tronçons, 14 clavages. Au 2e : (sur les reins seulement) 2 tronçons. Au 3e : 4 tronçons.	Voûte nue *18 jours* 26 octobre	t_c < 10mm t'_v 3mm6	— Fondations / Élévation / Ensemble Q : 2014mc / 3535mc / 5549mc Q : S_p : 2mc93 / 5mc14 / 8mc07 Q : W : 0mc22 / 0mc38 / 0mc60 D : 170550f / 206669f / 377219f D : S_p : 248f3 / 300f9 / 549f2 D : W : 18f3 / 22f2 / 40f5 D : Q : 84f7 / 58f5 / 68f0
	Retroussé sur 32m Grands arbalétriers *Bois rond* Boites à sable	6 » 1m00			3 rouleaux			D = 132 000f environ D : S_p = 383f3 D : W = 22f7
Marne et Nagelfluh (Conglomérat rocheux) » Pression maxima : 9k	Fixe Poteaux et contrefiches » Billots à base évidée	6 22cm 1m00 *80mm*			2 rouleaux, chacun en 8 tronçons. Joints secs au-dessus des points fixes du cintre. 1er rouleau clavé avant la construction du 2e.	Piles des voûtes d'évidement construites. » Juin	t_c 40mm t'_v 0	Q = 3760mc Q : S_p = 5mc15 Q : W 0mc49 D = 128 200f D : S_p = 175f9 D : W = 16f8 D : Q = 34f1

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets. Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE: *Longueur* entre abouts des parapets Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	PROJET — ENSEMBLE: Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	PROJET — GRANDE VOÛTE: INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	GRANDE VOÛTE: ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	GRANDE VOÛTE: ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	GRANDE VOÛTE: MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	GRANDE VOÛTE: PRESSIONS en kg/0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Krummenau** *Suisse* 1910–1911 Â¹ Fr (≥ 40m)25	*94m31* 21mm 18m20	4m60 *4m28* Fruits : des tympans 1,50 des bandeaux 1/40 1m20	Arc d'anse de panier à 3 centres **63m,26** *13m85* $\frac{1}{4,567}$ = 0,218 *Rayons :* *Cerveau : 44m46* *Reins : 38m14*	**1m,80** *2m72*	1m,80 *2m72*	L [1] Grès calcaire (Mollasse) 1200k *Ciment Portland* *0mc333* *Joints de 1cm à 6cm*	Pressions : max. / moy. sans surcharge : Clef 24k8 / 21k2 Retomb. 20k3 / 17k9 avec surcharge : et variation de température de ± 15°, sans tenir compte de la résistance à la tension. Clef 36k2 / 23k6 Retomb. 46k2 / 23k1 *Arc élastique* 1700k/m²	1° 10 voûtes transversales vues, en plein cintr de 3m50 sur piles de 1m à 1m20 2° »

1 Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, n° 6.

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg (0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] { de volume « utile » W [4].
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Nagelfluh (Conglomérat solide) » Pression maxima : 12k Rive gauche : *Épuisements dans un batardeau, puis béton immergé.*	Fixe Poteaux et contrefiches Billots à base évidée Zuffer	6 *22cm* 0m96 *130mm*	Cintre 217mc Palées 49mc3 Divers 18mc7 Bois 285mc0 Fers 8000k (sabots des pieux: 900k) Dép. 25500f	0mc77 21k6 68f9	4 rouleaux les 2 premiers en 8 tronçons. Joints secs, maintenus par des coins en bois, au-dessus des points fixes du cintre. Les 2 1ers roul. clavés ensemble	Piles des voûtes d'évidement construites *29 jours* 8 septembre	moyenne des 2 têtes t_c 25mm2 t'_v 3mm2 t''_v 23mm (pont achevé)	Q = 2 094mc Q : S_p = 4mc82 Q : W = 0mc36 Fondations : 25 000f Élévation : 104 000f **D = 129 000f** D : S_p = 297f4 D : W = 22f2 D : Q = 61f6

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\widehat{A}^{1}$ F^{r} $(\geqslant 40^{m})$

MONOGRAPHIES

PONTS SUR LA SCRIVIA, PRÈS DE MARETTA ET DE PRAROLO

(ITALIE, – Province de Gênes)

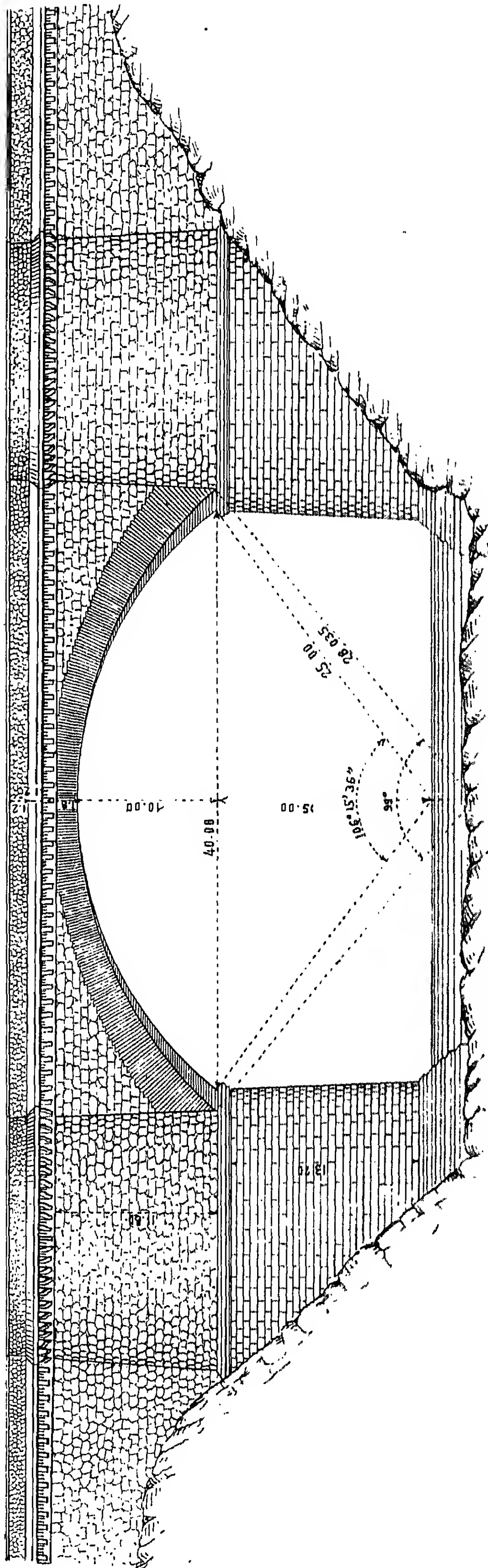
Ligne de Novi à Gênes[1]

1851-1852 $\widehat{A}^{1}$ F^{r} $(\geqslant 40^{m})$ 1 et 2

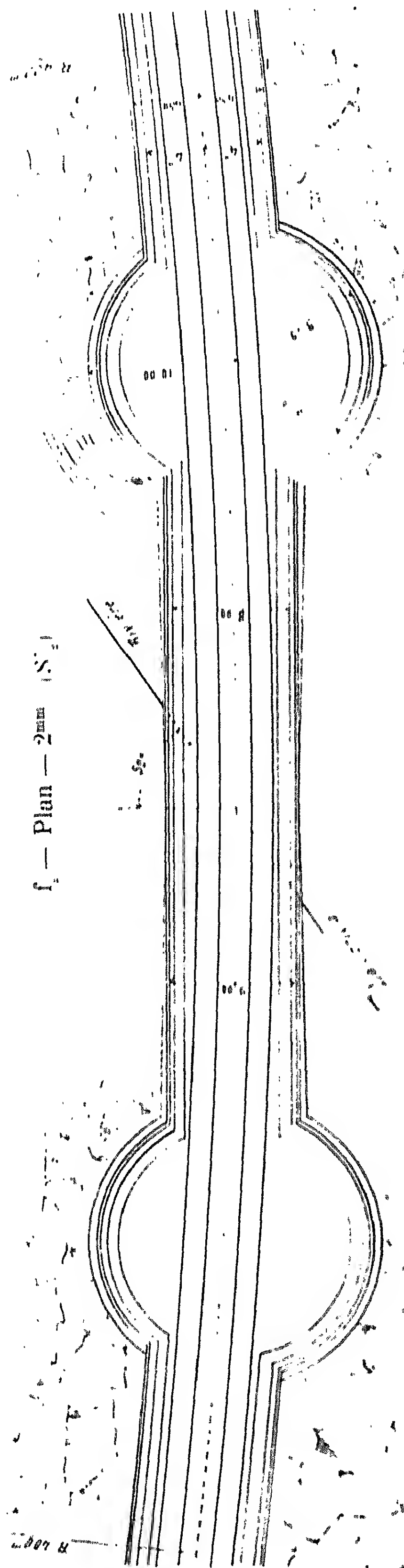
Φ_1 — Pont de Maretta (S_a)



1. — Entre les stations d'Arquata et d'Isola del Cantone : le pont de Maretta à $3^{k}620$ de celle-ci, le pont de Prarolo à $2^{k}030$.



f_1 — Élévation — 2mm (S'_2)



f_1 — Plan — 2mm (S'_2)

1. Pourquoi on a fait une grande arche. — Parce que les eaux de crues montent à 12^m, et vont vite.

Φ_2 — Pont de Prarolo (S_2)



2. Disposition en vue :

A. - du biais de 50ᵍ. — Pour éviter un appareil biais, on a construit les culées en forme de tronc de cône à fruit de 1/20, et engendré l'intrados par un arc de cercle de flèche constante (10^m) et de corde variable, se déplaçant parallèlement au plan vertical de l'axe du pont, et s'appuyant sur les circonférences, intersections des tours-culées avec le plan horizontal des naissances.

La douelle est ventrue au milieu : cela ne choque pas.

L'intrados sur l'axe est un arc de 40^m au 1/4 ; il se prolonge derrière ses pieds-droits, et est réellement un plein cintre complet de 50^m (f_2).

B. - de la courbe de 400^m. — Les têtes sont parallèles à la corde de 40^m du tracé.

C. - de la pente de 8^{mm}. — Le parapet est horizontal : la pente est répartie sur les trottoirs et le ballast.

3. Matériaux. — Les voûtes et leur prolongement dans la culée sont en briques s'écrasant en moyenne à 54k74, soit un peu plus de 4 fois la pression maxima, évaluée à 12k51.

f_3 — Coupe en long 1mm5 (S'_2)

Les briques des voûtes, de 26cm × 13cm, n'étaient pas en forme de voussoirs : on en employait de diverses épaisseurs (6cm5, – 6cm7, – 7cm), et on augmentait celle des lits de mortier jusqu'à 6mm.

La brique paraît bien conservée.

L'extrados est en courbe continue à Maretta ; avec crossettes, à Prarolo.

Au-dessus du cordon, les tours sont revêtues de gros moellons gris à Prarolo, de briques à Maretta.

4. Cintre. — « *Le cintre avait été projeté.... pour une voûte en pierre de* « *taille.*

f_4 2mm5 (S''_2)

f_5

« *Il est constitué de 7 fermes composées chacune de cinq rangs d'arbalétriers* « *disposés suivant le système adopté par M. Peronnet au pont de Neuilly.* » (S_1).

5. Fondations. — La culée rive droite du pont de Prarolo a été fondée sur le roc vif ; mais, à la culée rive gauche, on a trouvé un banc d'argile bleue, compressible. Quand on y battait un pieu, on faisait remonter le pieu voisin[2]. On posa sur l'argile un fort grillage en chêne, et on donna un grand empatement[3] au massif de fondation.

6. Dates. — Tassements.

	Maretta	Prarolo
Construction de la voûte	10 septembre / 14 octobre 1851	1852
Décintrement	14 février 1852	immédiatement après l'achèvement de la voûte
Tassement — du cintre chargé des briques de la voûte	180mm	80mm, sans aucune déformation
Tassement — de la voûte au décintrement	15mm	
Tassement — En tout	195mm	
Surhaussement donné au cintre	250mm	250mm

7. Personnel. — Ingénieur en chef : M. Ranco.

2. — « *La compression sur un point réagissait à des distances incroyables. Les remblais d'accès de* « *la culée gauche du pont, lorsqu'ils sont arrivés à 18m de hauteur, ont causé la chute d'un moulin placé* « *à la distance de 200m de ces remblais.* » (S_1).

3. — L'étymologie impose « empattement ». Mais l'Académie, au regret de Littré, écrit « empatement ».

SOURCES :

S_1. — (Texte). — Notice sur le projet et la construction des Ponts de 40m d'ouverture sur la Scrivia, près de Maretta et de Prarolo (Chemin de fer de Gênes à Turin), Chambéry, le 29 novembre 1860, M. Ranco (Bibliothèque de l'École des Ponts et Chaussées, Manuscrits, n° 1790).

S_2. — (Dessins).

S'_2. — Collection des Dessins distribués aux Élèves de l'École des Ponts et Chaussées, 3e série, section A, Pl. 4.

(La légende explicative, tome I, p. 74 à 79, est empruntée à S_1).

S''_2. — Dessin à 1/50 communiqué par M. Ranco (Bibliothèque de l'École des Ponts et Chaussées, Manuscrits, n° 1790).

S_3. — Ce que j'ai vu — octobre 1908.

PONTS SUR LA SCRIVIA, PRÈS D'ISOLA DEL CANTONE[1, 2]

(ITALIE, – Province de Gênes)

Ligne de Novi à Gênes

1852 $\widehat{A}^1$ F^{er} (40^m,3 et 4

Φ_1 – Pont en amont d'Isola del Cantone (S_1)



Voici les seuls renseignements que j'ai trouvés sur ces 2 ponts :

« *Dans l'intervalle de tems qui s'est écoulé entre le décintrement du pont de* « *Maretta et celui de Prarolo, nous avions dû achever deux autres ponts à un seul* « *arc de la même ouverture (40^m), dont la voûte était aussi en briques. Nous avions* « *décintré ces deux arcs, l'un après un mois et l'autre après deux mois de leur* « *clôture. On avait obtenu un abaissement, mesuré à la clef de la voûte, de 3^{cm} 1/2* « *pour le premier et de 5^{cm} pour le second.* » (S_1).

1. — L'un, à 1^{k}518 en amont, c'est-à-dire vers Ronco, de la station d'Isola del Cantone, l'autre, à 1^{k}437 en aval, c'est-à-dire vers Arquata.

2. — Dans la statistique des Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1886, p. 512bis, Ponts n°s 41, 42, j'ai, d'après M. Clericetti, Professeur à l'École des Ingénieurs de Milan, donné ces deux ponts sous les noms de Battaglia et Premna : il n'y a pas, dans le voisinage, de villages de ce nom.

Au pont d'aval, l'extrados est à crossettes comme à Prarolo[4]. Au pont d'amont, il est en courbe continue comme à Maretta[5].

La brique paraît bien conservée.

Φ_2 — Pont en aval d'Isola del Cantone (S_2)



Aux deux ponts, les murs en retour sont plans, et non arrondis comme à Prarolo[4] et Maretta[5] : ils sont revêtus de grosses assises de brèche.

4. — $\hat{\mathbf{A}}^1$ Fer (– 40m) 2

5. — $\hat{\mathbf{A}}^1$ Fer (– 40m) 1

SOURCES :

S_1. — Notice sur le projet et la construction des Ponts de 40m d'ouverture, sur la Scrivia, près de Maretta et de Prarolo (Chemin de fer de Gênes à Turin), Chambéry, 29 novembre 1860, M. Ranco (Bibliothèque de l'École des Ponts et Chaussées, Manuscrits n° 1790).

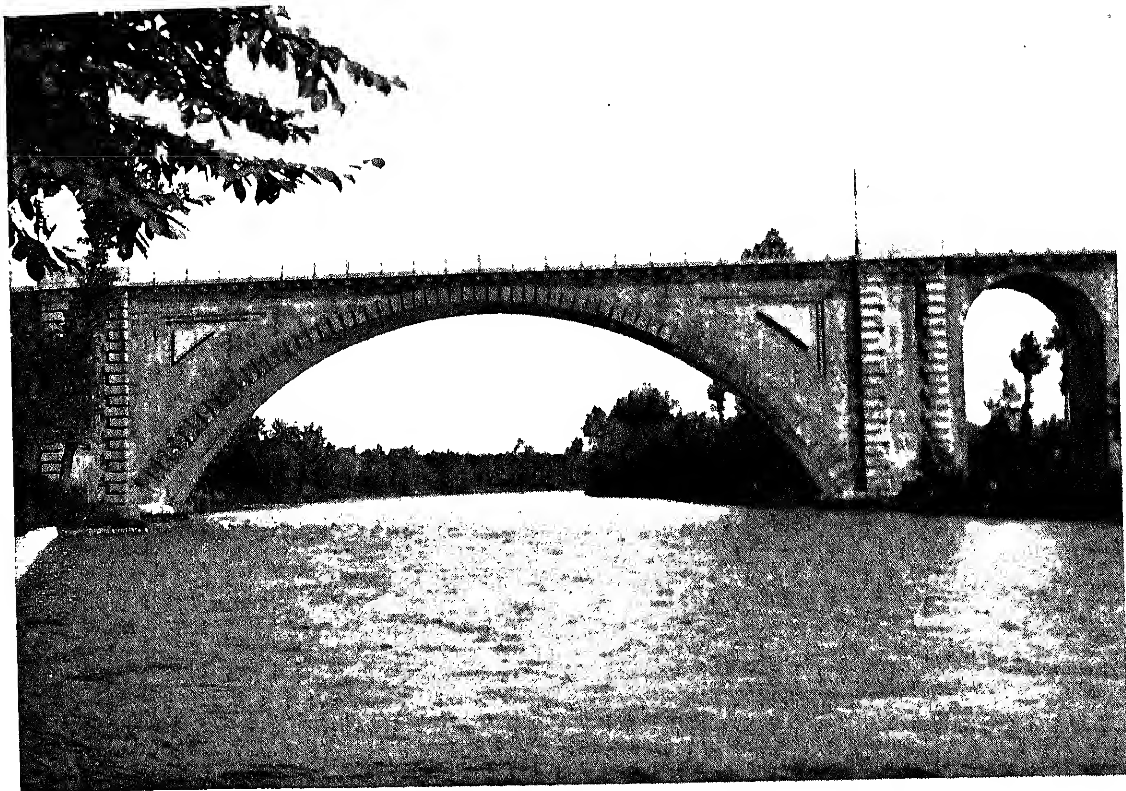
S_2. — Ce que j'ai vu — octobre 1908.

PONT SUR L'OGLIO, PRÈS DE CALCIO[1] *(ITALIE, — Lombardie)*

Chemin de fer de Milan à Venise, — Section de Treviglio à Rovato

1877–1878 $\widehat{A}^1_1$ Fer C. 40m50

Φ_1 (S_1)



1. Choix de l'ouverture. — Les Ingénieurs avaient jugé suffisante pour les crues l'ouverture de 36m. On l'a portée à 42m, pour satisfaire la ville de Cremone, propriétaire du canal navigable partant de l'Oglio à 300m en aval.

2. Matériaux. — Par économie, on a fait en briques (40f50 le m. c.) toute la grande voûte : bandeaux, douelle et corps.

Pour accidenter les bandeaux, on a fait ressauter des groupes de 8 assises, séparés par deux assises en retraite.

La différence de 0m98 entre les épaisseurs de la voûte à la clef et aux reins est rachetée par 6 ressauts de 0m14.

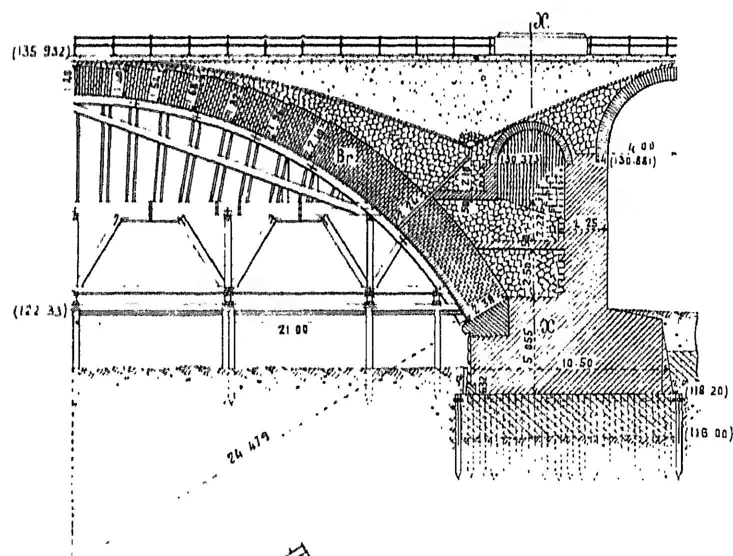
On a placé les matériaux les moins résistants, là où il y a le plus à porter.

1. — Entre Calcio et Chiari, à 1k600 environ de Calcio.
Dans la statistique (Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1886, « *Construction des Ponts du « Castelet, de Lavaur et Antoinette* », p. 542ter, n° 32), je l'ai appelé Pont de Rovato.

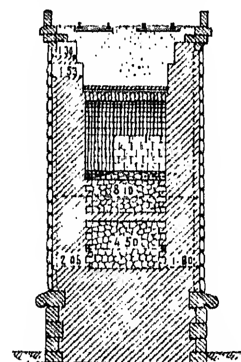
f₁ — Ensemble — 1mm

f₂ — Grande voûte — 2mm

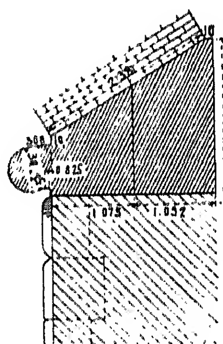
f₃ — Coupe en long et cintre — 2mm5



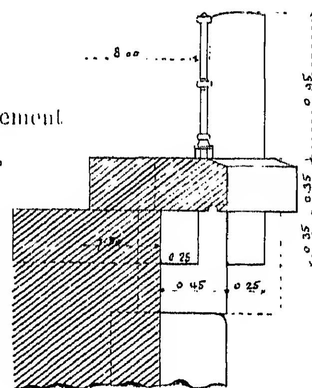
f₄ — Coupe en travers sur x.x de f₃ — 2mm5



f₅ Imposte 1cm



f₆ Couronnement 2cm



Sur la grande voûte, qui est en briques, reposent les tympans en calcaire assisé, faisant cadre autour d'un triangle de grosses pierres de taille.

Ce cadre eût pu demeurer vide, sans dommage pour l'aspect.

Aux pilastres, deux vigoureuses chaînes d'angle enserrent de petits moellons ; il eût fallu tout revêtir en gros appareil.

3. Construction de la grande voûte.

3. Construction de la grande voûte. — La voûte, en briques (785^{m^3}), a été construite en 25 jours par 24 maçons.

Quand la voûte fut montée à 21^m de ses naissances, on observa, à 14^m d'elles, une fente de $1/2^{mm}$ pénétrant à 0^m50.

4. Personnel[2].

Projet et Direction des Travaux : M. le Commandeur Cesare Bermani, Ingénieur de la Division des Chemins de fer de la Haute-Italie.

Entrepreneurs : MM. Bianchi-Bellati.

2. — Renseignements gracieusement communiqués, sur l'invitation de M. le Commandeur Cajo, par M. Edouard Garneri, Chef du Service de l'Entretien des Chemins de fer de l'État, à Bologne (Mars 1911).

SOURCES :

S_1. — La Ferrovia Treviglio-Rovato : « *Ponte Viadotto sul fiume Oglio* », p. 12 à 18, Pl. 4 et 5, note de M. Cesare Bermani, datée de Milan : 18 mars 1878.

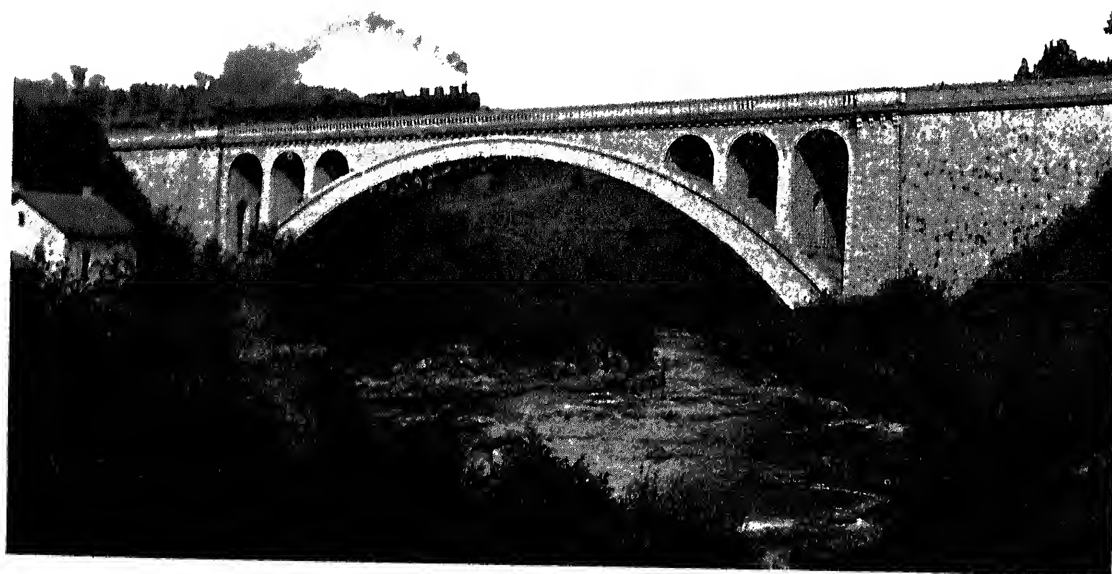
S_2. — Ce que j'ai vu — juin 1908.

PONT SUR LA VÉZÈRE, AU **GOUR-NOIR** *(CORRÈZE)*

Ligne de Limoges à Brive, par Uzerche [1]

1888-1889 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ I^{r} ($\geqslant$ 40m)6

Φ_1 — amont (S_4)



1. Pourquoi on a fait une grande voûte. — Le tracé coupe la rivière sous un angle de 56°. C'est pour éviter des piles biaises dans une rivière à crues fréquentes et brusques, qu'on a jeté cette grande voûte par-dessus un îlot de granit.

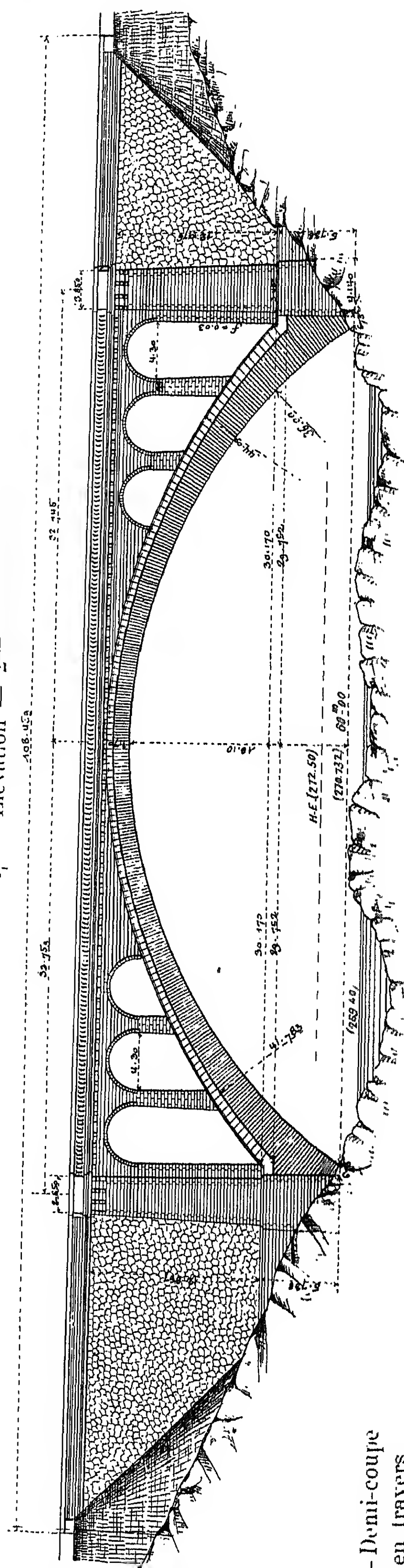
2. Bandeau et archivolte (Φ_1, f_1). — Les queues des voussoirs du bandeau sont sur une courbe parallèle — à l'intrados, au-dessous du milieu de la voûte, — à l'extrados, au-dessus.

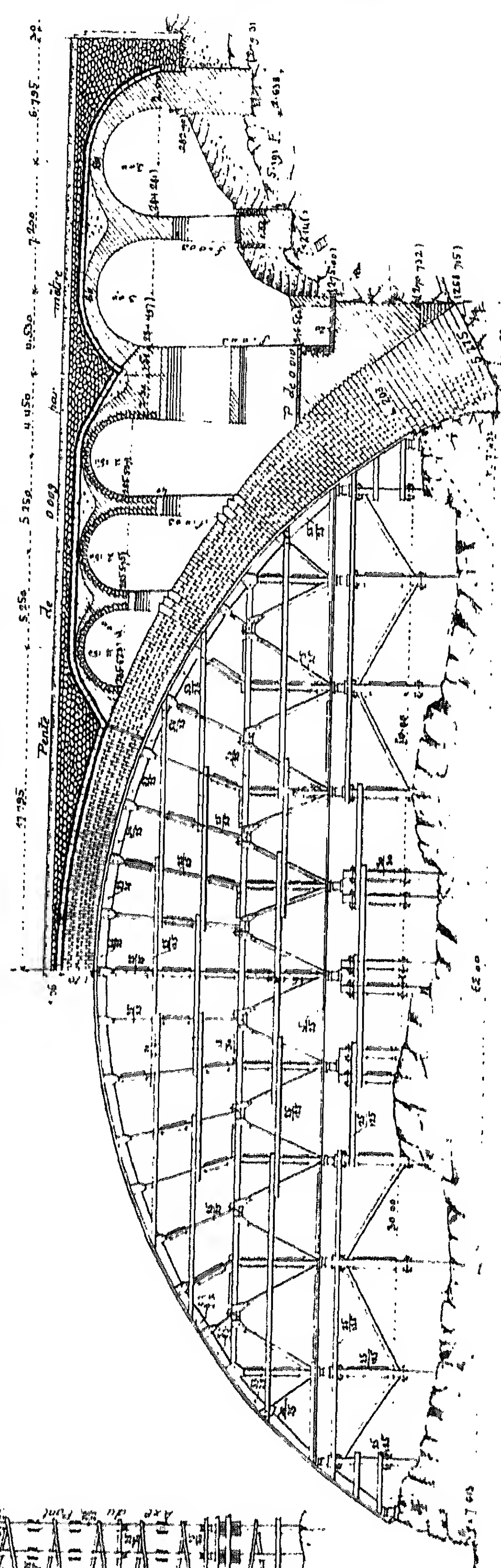
Le bandeau, en fruit de 5cm, est relevé par une archivolte en fruit de 6cm, dont l'épaisseur est le 1/4 de celle du bandeau.

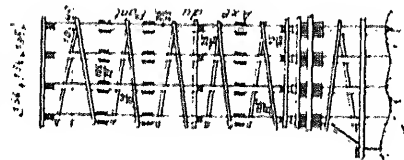
Sur un bandeau en moellons à bossages, une archivolte lisse, et qui est restée claire, ne paraît pas à sa place. Son retour horizontal aux reins semble court.

3. Pilastres des culées (Φ_1, f_1). — Appliqués contre les murs pleins des culées, ils ne les arrêtent pas, ne les détachent pas du corps central.

1. — Entre les stations d'Uzerche et de Vigeois, à 3k910 d'Uzerche.


f₁ — Élévation — 2mm

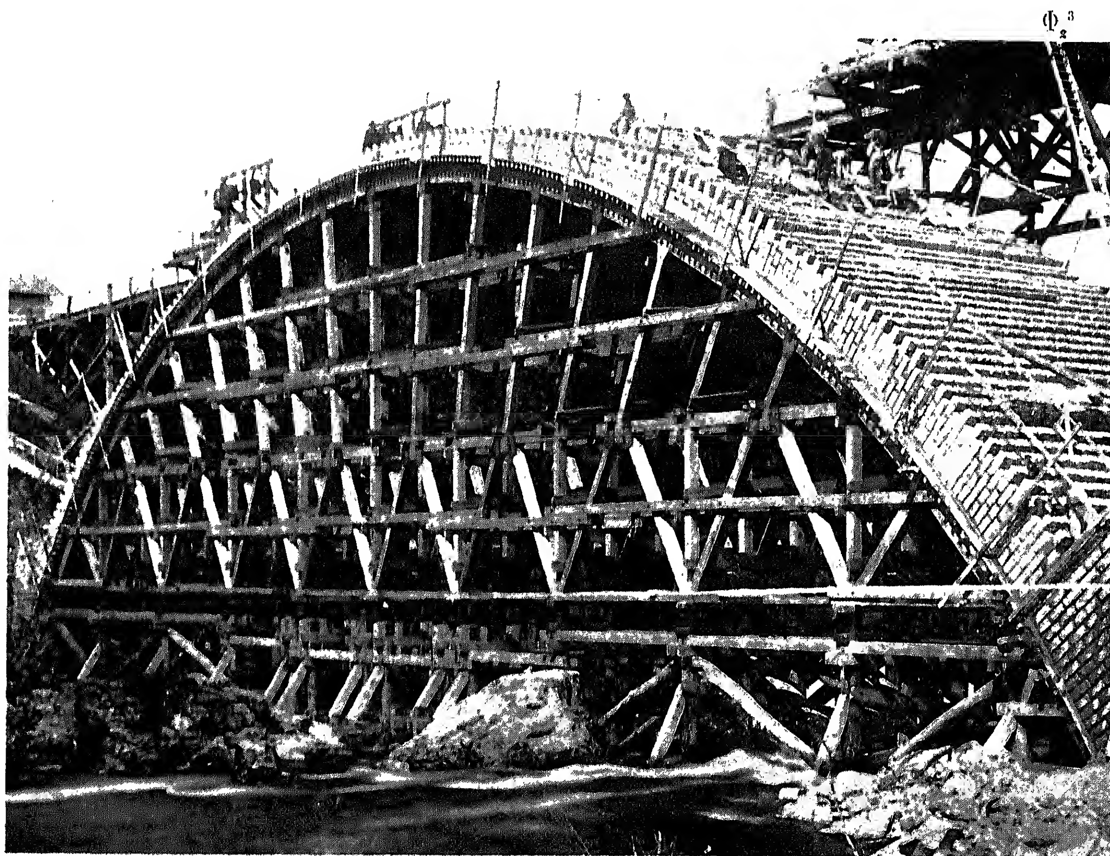

f₂ — Coupe en long — Élévation du cintre — 2mm5


f₃ — Demi-coupe en travers du cintre — 2mm5

4. Joints vus d'extrados. — Sur les parties vues de l'extrados, les joints ont été dégradés, puis bourrés de mortier pulvérulent de ciment.

5. Cintre. — *A. Description.* — Il est imité de celui du pont de Lavaur [2].

Φ_2 [3]



Les pieux, coupés d'équerre, armés à leur base d'une tôle de 2^{cm}, étaient scellés au mortier pulvérulent de ciment, dans des trous forés [4] dans le rocher, quelques-uns au trépan, la plupart à l'aiguille, à l'abri de batardeaux (10 mai-7 août 1888) (S_3).

Les vaux, d'une seule pièce, avaient 4^m de longueur au plus ; les couchis de 10^{cm} × 15^{cm}, d'une seule pièce, étaient espacés de 40^{cm} aux reins, de 21^{cm} à la clef.

Le platelage, de 25^{mm}, était en lames de 4^m au moins, assemblées à rainures et languettes.

Les assemblages étaient recouverts, sur leurs deux faces, de tôles de 7^{mm}.

Le cintre a été taillé du 25 juillet au 27 août 1888.

Pour tenir compte de la saillie des bossages de la douelle, on avait donné au cintre un rayon inférieur de 4^{cm} à celui de la douelle. Les moellons de douelle, dont le bossage était inférieur à 4^{cm}, étaient posés sur cales de chêne.

2. - $\widehat{A}^1\ F^{er}$ (- 40m)^4 - 1882-1884 — Tome II.
3. - Photographie gracieusement communiquée par l'Ingénieur du Pont, M. Draux.
4. - Le mètre courant de forage a coûté : au trépan, 318f20 : à l'aiguille, 40f90.

B. ***Quantités et dépenses.***

		Au-dessous des boîtes à sable	Au-dessus des boîtes à sable	Ensemble
Cube de bois		169 mc 359	345 mc 911	515 mc 270
Poids de fer		3795k	16900k	20695k
Dépense	Fourniture	11947f89	19121f85	31069f74
	Main-d'œuvre	19000f	7289f93	26289f93
	Ensemble	30947f89	26411f78	57359f67
	par mètre cube de bois	*182f74*	*76f36*	*259f10*

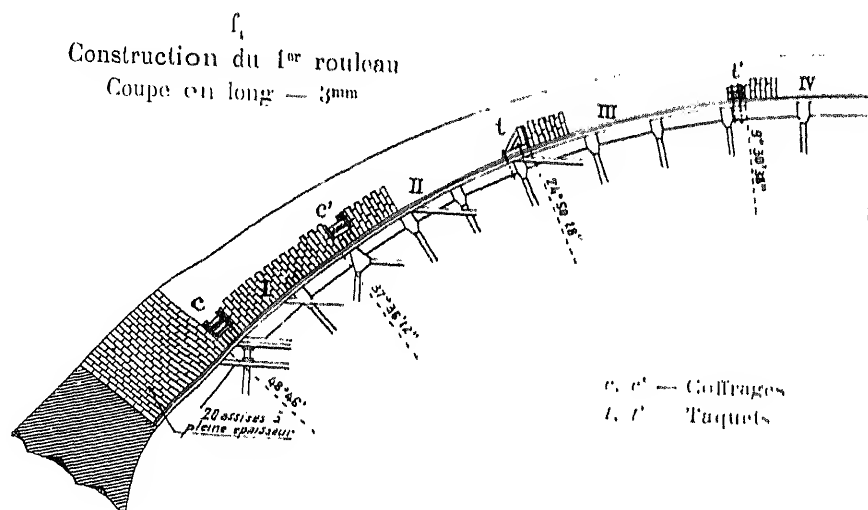
6. Exécution de la grande voûte. — *A. Division en rouleaux et tronçons.* — Les 20 premières assises au-dessus de la retraite, jusqu'à la semelle supérieure des boîtes à sable à 48°46', ont été construites à pleine épaisseur, à mortier de ciment à 800k.

Au-dessus, la voûte a été construite en 3 rouleaux (S_1), divisés chacun en 8 tronçons.

On chargea le cintre, du 27 février au 5 mars 1889, de 546mc de moellons et de pierres cassées : il tassa de 8mm ; quand on enleva cette charge (7 mars–13 mars), le côté aval se releva de 3mm.

B. 1er Rouleau. — On a suivi le mode de construction du pont de Lavaur[a].

On construisit d'abord les tronçons I et I' sur coffrages *c* ; puis les autres simultanément : II et II' sur coffrages *c'* : III et III', IV et IV' sur taquets *tt'* (f_1).



f_1
Construction du 1er rouleau
Coupe en long — 3mm

On ménageait, au-dessus de chaque point fixe du cintre, des joints secs, sur bandes de plomb de 30mm de largeur et 18mm d'épaisseur, à 2cm en arrière de l'intrados, et sur cales de chêne à l'extrados.

Les parties des bandeaux correspondant aux joints secs étaient construites immédiatement à mortier : on constata une fissure au droit de l'emplacement de chaque clavage. Ceci justifie bien la division en tronçons.

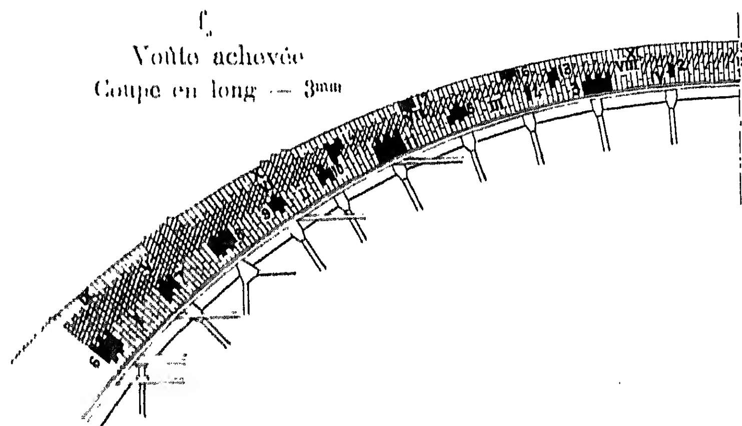
Lorsqu'on eut maçonné jusqu'aux 2/3 du premier vau (32ᵉ assise), une fissure de 1 à 2mm s'ouvrit dans les têtes, en face des premières assises posées à sec.

Peu après (35ᵉ assise), le cerveau du cintre, sur 25° de chaque côté, se releva de 3mm au sommet amont, de 5mm au sommet aval : le point à 25° de la clef n'a pas bougé.

On le chargea de 100mc de moellons, qui l'abaissèrent de 1mm à la tête amont, de 3mm à la tête aval.

On clava, du 18 avril au 4 mai, à partir de la clef jusqu'à la 5ᵉ contrefiche, puis à partir des naissances, au mortier de ciment à 650k à l'état de sable humide [6].

Il ne s'ouvrit pas de fissure pendant le clavage.



C. *Renseignements sur l'exécution de la grande voûte.*

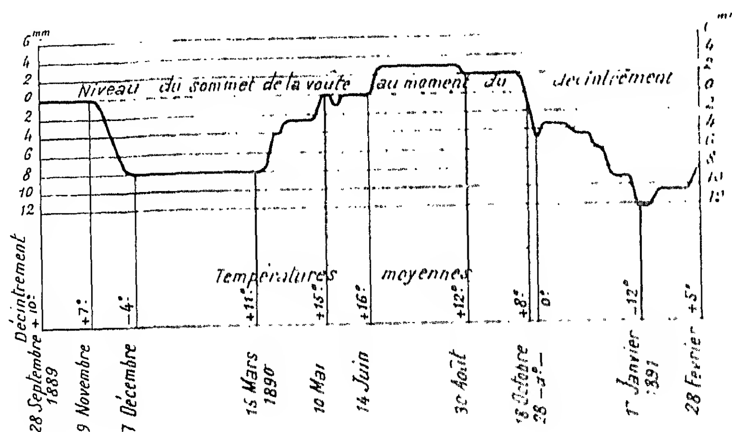
		Fondations (793mc)	Assises à pleine épaisseur (372mc)	1er Rouleau (592mc)	2e Rouleau (455mc)	3e Rouleau (324mc)	Moyenne et ensemble pr la voûte
Dates	du commencement	25 oct. 1888	20 déc. 1888	10 mars 1889	5 mai 1889	28 juin 1889	25 oct. 1888
	de la fin	19 déc. 1888	22 fév. 1889	4 mai 1889	5 juin 1889	5 août 1889	5 août 1889
Nombre	de tronçons	"	"	8	8	8	24
	de clavages	"	"	21	5	5	31
Durée d'exécution en journées (travail effectif)		44 j	28 j	37 j	28 j	39 j	176 j
Cube de maçonnerie exécutée par jour de travail effectif		18mc02	13mc29	16mc00	16mc25	8mc31	14mc41
Cube de maçonnerie exécutée par journée de 10h de maçon		1mc48	1mc08	1mc04	1mc03	0mc82	1mc06
1mc de maçonnerie de voûte a exigé :							
Heures de maçon		6h70	12h12	9h64	9h66	12h26	9h45
Heures de manœuvres		17h07	9h23	16h32	15h19	13h52	16h42
Poids de ciment		209k	202k	144k	212k	160k	215k
Nombre de maçons employés par jour		12	16	13	15	10	14
Prix de la main-d'œuvre d'un mètre cube		8f54	12f21	10f3[illegible]	9f87	11f92	10f16

6. — 9 à 12 litres d'eau pour 50k de ciment.

7. Mouvements de la voûte dus aux variations de température. — Le premier rouleau avait été clavé par une température de 0° à 5°. Avant de claver les 2e et 3e rouleaux (juin et août), on arrosa continuement, pendant 4 jours, les maçonneries, pour les abaisser à + 8°.

Voici les mouvements de la clef observés du 28 septembre 1889 (décintrement) au 28 février 1891.

f_6 — Mouvements de la clef

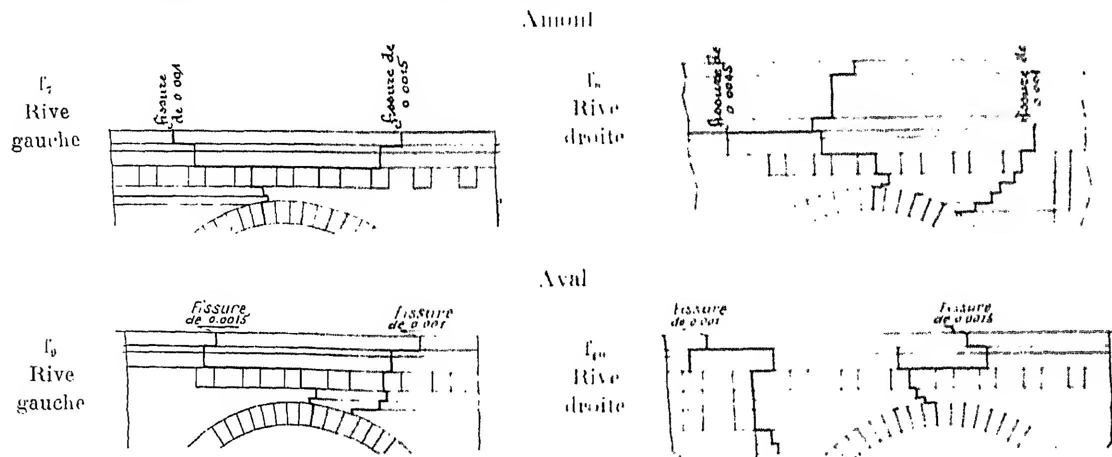


Pour un refroidissement de 20°, la clef baissa de 12mm [7] ; en juin 1891, elle remonta à sa position du décintrement et la dépassa de quelques millimètres en juillet et août (S_2).

La grande voûte ne s'est pas fissurée.

Les tympans et les parapets se sont ouverts, pendant l'hiver 1890-1891, à la clef des voûtes d'évidement voisines des pilastres (f_7 à f_{10}).

Fissures dans les dernières voûtes d'évidement et au-dessus 8mm



7. — Le développement moyen de l'arc est 83m56, savoir : joints, 14m76 ; granit, 68m90. En admettant pour les coefficients de dilatation : du mortier de ciment, 14×10^{-6} ; du granit, 8×10^{-6}, on trouve, pour un abaissement de 20°, un raccourcissement de : $20° \times 10^{-6}$ [14m76 × 14 + 68m90 × 8] = 0m015157.

En supposant que la courbe déformée soit encore un arc de cercle, l'abaissement correspondant à la clef est 0m0115, au lieu des 0m012 mesurés. (Calcul donné par M. Draux) (S_4).

8. Personnel.

Ingénieurs. — en chef : M. Daigremont ; — ordinaire : M. Draux.
Entrepreneur : M. Justin Prade (S_3).

SOURCES :

S_1. — Annales des Ponts et Chaussées, 1892, 1er semestre, p. 545 à 596, Pl. 5 à 7 : « *Notice sur la construction du Viaduc du Gour-Noir* ». M. Draux, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

S_2. — Collection des Dessins distribués aux Élèves de l'École des Ponts et Chaussées, Série 4, section C, Pl. 51. — Légende explicative, tome III, p. 1054 à 1067.

S_3. — Chemin de fer de Limoges à Brive par Uzerche. — Rapport sur l'exécution des travaux, p. 50 à 54, Pl. 12 et 13.

S_4. — Ce que j'ai vu — juin 1908.

Les dessins sont extraits de S_1 et de S_2.

PONT SUR LA VÉZÈRE, A POUCH (CORRÈZE)

Ligne de Limoges à Brive, par Uzerche[1]

1890 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr ($\geq$ 40m)7

Φ_1 (S_2)



1. Pourquoi on a fait une grande voûte. — Le tracé est à 11° sur la Vézère : une grande voûte a évité des piles biaises en rivière.

2. Cintre. — Il est imité de celui du pont Antoinette[2].

Comme on ne pouvait creuser le rocher, même à l'aiguille, on nettoya sa surface, et on la régularisa avec du béton de ciment, sur 0^m20 à 0^m40.

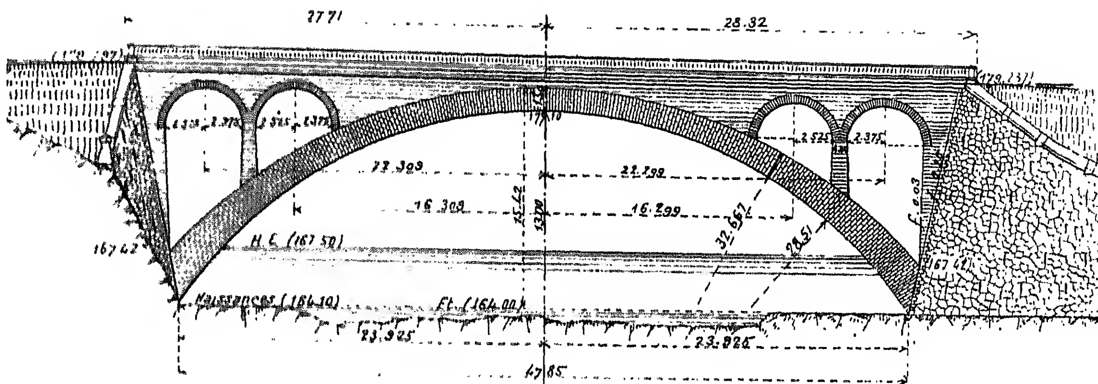
On fixa dessus des lambourdes, sur lesquelles on appuya le pied des pieux.

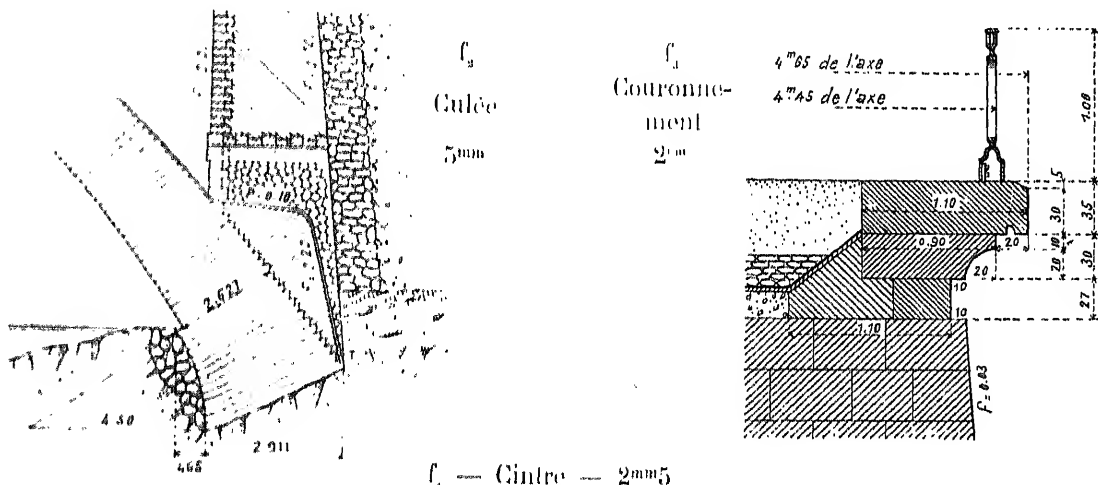
3. Construction de la voûte. — Elle a été construite du 1er mars au 10 juin 1890, en trois rouleaux.

1. — Entre les stations d'Estivaux et d'Allassac, à 2^k730 d'Estivaux.

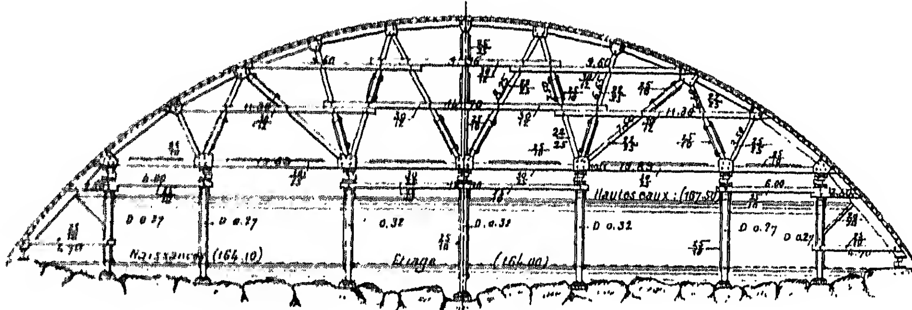
2. — $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr ($\geq$ 40m)5 — Tome II.

f₁ — Élévation — 2mm





f₄ — Cintre — 2mm5



4. Personnel.

Ingénieurs. — en chef : M. Daigremont ; — ordinaire : M. Guillaume.

Entrepreneurs : MM. Paviot, Lafeuille et Chaumeil.

SOURCES :

S_1. Chemin de fer de Limoges à Brive, par Uzerche. — Rapport sur l'exécution des travaux, p. 56 à 59, Pl. 16.

S_2. — Ce que j'ai vu — juin 1908.

PONT SUR LA VÉZÈRE, A FREYSSINET (CORRÈZE)

Ligne de Limoges à Brive, par Uzerche[1]

1890–1891 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ $F^r(\geqslant 40^m)8$

Φ_1 (S_2)



1. Pourquoi on a fait une grande voûte. — Le tracé coupe la Vézère sous un angle de 50° : une grande voûte a évité des piles biaises en rivière.

2. Appareil. — Couronnement. — Comme au pont de Pouch[2].

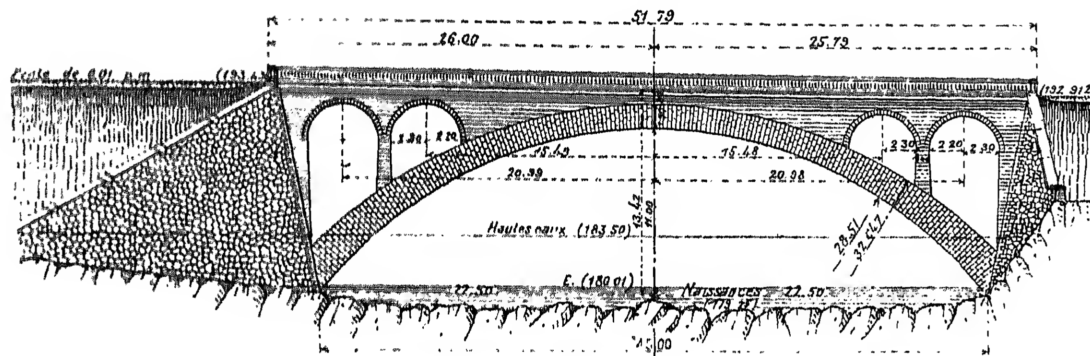
3. Cintre. — On y a réemployé celui du pont de Pouch.

Comme à Pouch, les pieux portent sur des lambourdes fixées sur un lit de béton régularisant la surface du rocher, mise à nu et nettoyée.

1. — Entre les stations d'Estivaux et d'Allassac, à 1k250 d'Estivaux.

2. — $\widehat{\mathbf{A}}^1$ $F^r(\geqslant 40^m)^7$ — Tome III.

f_1 — Élévation — 2mm



4. Personnel. — Comme au pont de Pouch[2].

SOURCES :

S_1. Chemin de fer de Limoges à Brive, par Uzerche, – Rapport sur l'exécution des travaux, p. 56 à 59, Pl. 15.

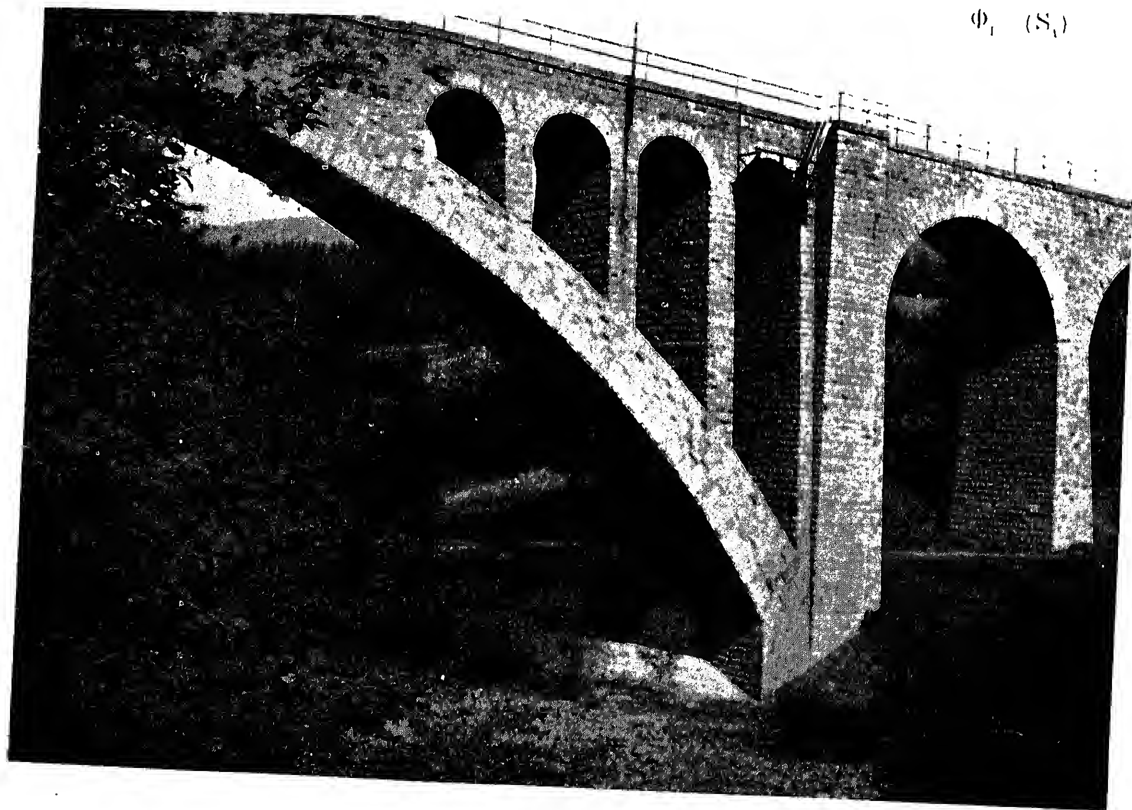
S_2. Ce que j'ai vu juin 1908.

PONT SUR LE PRUTH, A JAREMCZE[1] (AUTRICHE, - *Galicie*)

Ligne de Stanislau (Galicie) — Woronienka — Szigeth (Hongrie)

1893–1894 $\widehat{A}^1$ Fr ($\geq$ 40m)9

Φ_1 (S_1)



1. Pourquoi on a adopté une grande voûte (S_1). — La ligne traverse en biais la rivière.

On a accepté la portée de 65m, après les essais sur les voûtes, faits en Autriche en 1890-1891[2].

2. Aspect (S_3). — Cette grande voûte porte sur de courts pieds-droits : sans eux, l'aspect serait meilleur, la voûte moins tendue.

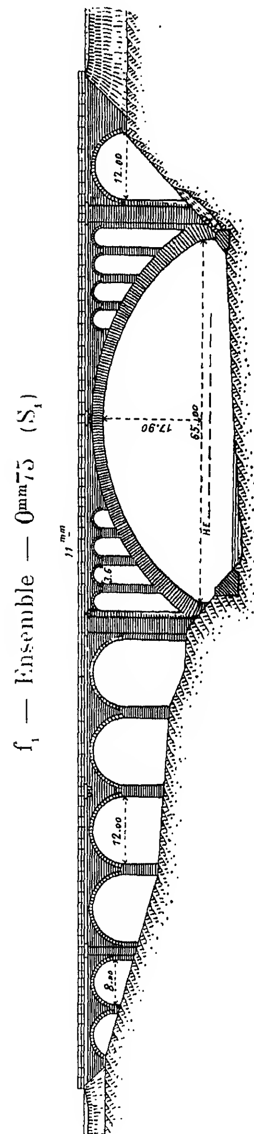
Les dernières piles d'élégissement sont trop hautes.

3. Chape (S_2). — Sur 5 à 9cm de béton, 2cm d'asphalte recouverte, après prise, de sable grossier[3].

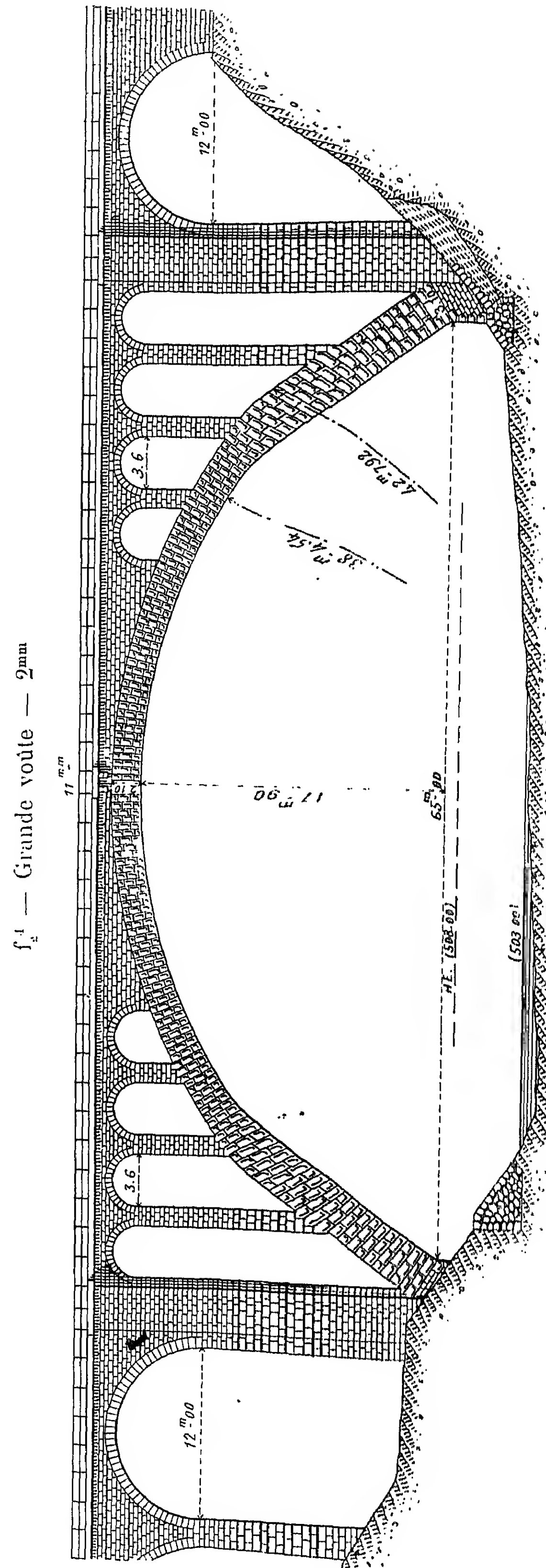
1. — A 650m au-delà, vers Woronienka, de la station de Jaremcze.

2. — Ils sont exposés plus loin : Tome III, Livre II.

3. — Prix du m. q. : 6fl 88kr = 14f45.



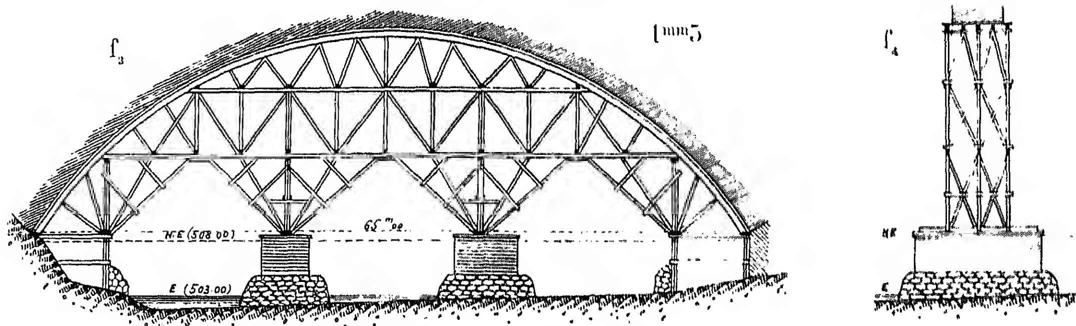
f_1 — Ensemble — $0^{mm}75$ (S_1)



f_2^1 — Grande voûte — 2^{mm}

1. — Agrandi d'après S_1. — L'appareil est dessiné d'après mes photographies.

4. Cintre (S_1).



5. Exécution de la grande voûte.

— A l'exemple des ponts français[5], la grande voûte a été construite en trois rouleaux (S_4).

Au 1er, les voussoirs étaient posés à sec, d'abord en 6 attaques, plus tard en 8, avec joints de 18mm au moins, sur liteaux en bois, matés ensuite en 5 jours 1/2, au mortier humide.

En mars 1894, on posait 6 à 10 assises par jour (S_4).

6. Avantages du matage (S_2).

— « *L'expérience a montré qu'il était* « *très utile de poser à sec et de mater. Le mortier atteint une dureté inouïe; sa* « *liaison à la pierre est aussi intime qu'entre ses molécules elles-mêmes; il n'y a* « *pas d'espace vide, car on peut exercer une surveillance minutieuse en raison de la* « *courte durée de la construction.* »

7. Main-d'œuvre et fournitures pour la grande voûte (S_2).

On y a employé :	en tout	par m.c. de moellons (1060m³)
Journées de maçons	679 j	0 j 64
Journées de manœuvres	1071 j	1 j 00
Journées de chevaux	52 j	0 j 05
Ciment Portland	55 t 2	52 k 1
Mortier maté	121m³	0m³ 114

8. Dates.

Achèvement du cintre (S_2)	décembre 1893
Grande voûte — Commencement	mars 1894 (S_4)
Grande voûte — 1er rouleau — Fin de la pose	8 avril
Grande voûte — 1er rouleau — Clavage (matage des joints)	mi-avril (S_4)
Grande voûte — Clavage du 3e rouleau	10 mai
Achèvement des voûtes d'élégissement et d'accès	fin juillet
Décintrement	2e moitié d'août
Ouverture à la circulation	20 novembre 1894

5. — « *Im Einklange mit französischen Bauausführungen....* » (S_1).

9. Épreuves (S₄). — Aucune déformation sous un train de 3 locomotives, le 11 novembre 1894.

10. Grandes voûtes imitées de celle de Jaremcze. — Les dispositions principales de Jaremcze ont été reproduites à toutes les grandes voûtes sous chemin de fer :

d'Autriche (Ponts de Jamna, Worochta, Krenngraben, Steyrling, Salcano[6], Palmgraben, Schalchgraben, Rothweinbach[7]).

du Grand Duché de Bade (Ponts sur la Gutach, sur le Schwändeholzdobel, de Langenbrand[8]).

Ç'a été un pont type.

11. Personnel.

Ingénieurs :

Projet : M. Huss, Ingénieur en chef de la Direction des Chemins de fer, à Vienne (S_1).

Direction des Travaux : M. Kosinski, Inspecteur à Stanislau (Galicie) (S_3).

Entrepreneur : M. Johann Koller, à Stanislau (S_3).

6. — Â[1] Fr 1 — 40m,10, 11, 17, 18, 19 — Tome III.

7. — Â[1] Fr 1 — 40m,8, 9, 10 — Tome II.

8. — Â[1] Fr 1 — 40m,12, 13, 21 — Tome III.

SOURCES :

Zeitschrift des œsterreichischen Ingenieur - und Architekten Vereins :

S_1. 20 octobre 1893, p. 545 à 547, Pl. XXIV : « *Mittheilungen über die grossen gewölbten* « *Brücken der K. K. Staatsbahn Stanislau-Woronienka* », von Ober-Inspector Ludwig Huss, Vorstand des Bureaus für Unterbau und Brücken der K. K. General-Direktion der œsterreichischen Staatsbahnen, octobre 1893.

(Cet article a été écrit avant la construction de la voûte).

S_2. 1894, p. 533 à 535 : « *Die Bauvollendung der grossen gewölbten Brücken der K. K. Staatsbahn Stanislau-Woronienka.* » Ludwig Huss.

S_3. Renseignements qu'a bien voulu me donner, sur place, M. G. Geyer, Directeur du réseau de Galicie, — septembre 1909.

S_4. Ce que j'ai vu — septembre 1909.

PONT SUR LE PRUTH, A JAMNA [1] (AUTRICHE, - *Galicie*)

Ligne de Stanislau (Galicie) — Woronienka — Szigeth (Hongrie)

1893-1894 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ F^r ($\geqslant$ 40m)10

Φ_1 (S_4)



1. Quelques observations (S_4). — Même appareil, mêmes maçonneries, même chape qu'à Jaremcze [2].

L'appareil du bandeau se continue dans le pilastre.

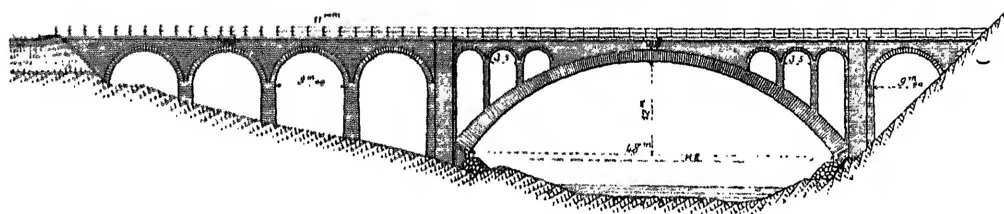
La plinthe paraît maigre.

2. Exécution de la grande voûte. — Même méthode qu'à Jaremcze [2], mais avec 2 rouleaux au lieu de 3.

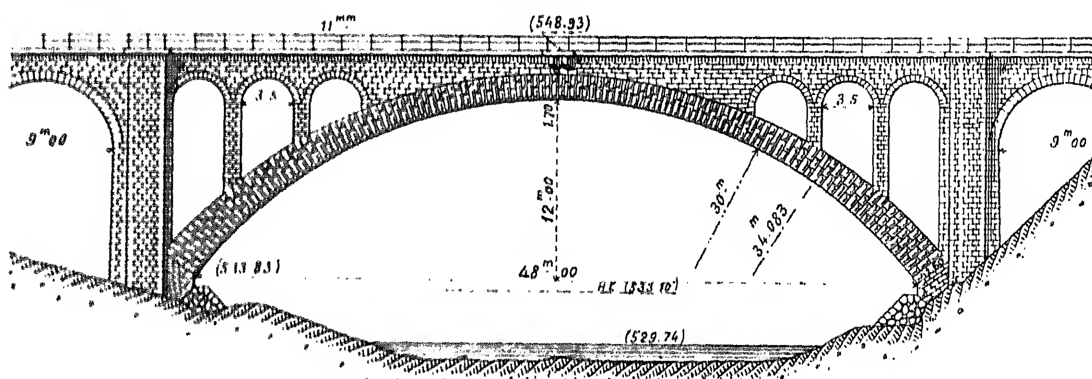
1. — A 1k096 en deçà, vers Stanislau, de la station de Jamna.

2. — $\widehat{\mathbf{A}}^1$ F^r ($\geqslant$ 40m)9 — Tome III, p. 114.

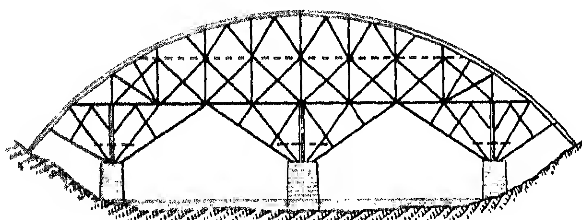
f_1 — Ensemble — 1mm



$f_2{}^3$ — Grande voûte — 2mm



$f_3{}^4$ — Cintre



3. Dates.

Commencement des travaux......................................	1893
Achèvement du cintre..	décembre (S_2)
	1894
Fin de la pose des moellons du premier rouleau....................	8 avril
Clavage du 2e rouleau...	10 mai
Achèvement des voûtes d'élégissement et d'accès..................	fin juillet
Décintrement	2e moitié d'août
Épreuves (même résultat qu'au Pont de Jaremcze [2])...............	11 novembre
Ouverture à la circulation.......................................	20 novembre

4. Personnel. — Comme au Pont de Jaremcze [2].

3. Agrandi d'après S_1. — L'appareil est dessiné d'après Φ_1.
4. — Calqué sur une photographie (S_2, p. 534).

SOURCES :

Celles du Pont de Jaremcze Â[1] Fr (≥ 40m) 9, p. 117.

PONT SUR LE PRUTH, PRÈS DE **WOROCHTA** [1,2] *(AUTRICHE, – Galicie)*

Ligne de Stanislau (Galicie) — Woronienka — Szigeth (Hongrie)

1893-1894 $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant$ 40m) 11

Φ_1 (S_1)



1. Quelques observations (S_2). — Mêmes dispositions générales qu'à Jaremcze [3] et à Jamna [4].

Les bandeaux ont un léger bossage ; la douelle, à taille plate, a mêmes épaisseurs d'assise.

La plinthe paraît maigre.

Beaucoup de moellons de douelle sont attaqués.

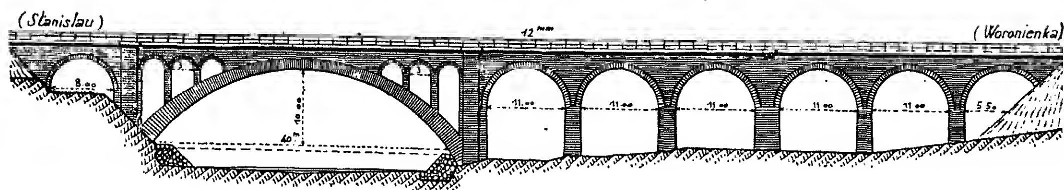
1. — A 523m en deçà, vers Stanislau, de la station de Worochta.

2. — Il y en a un autre, — voûte en arc peu surhaissé, de 34m60 d'ouverture, avec tympans élégis, entre deux viaducs d'accès (S_1).

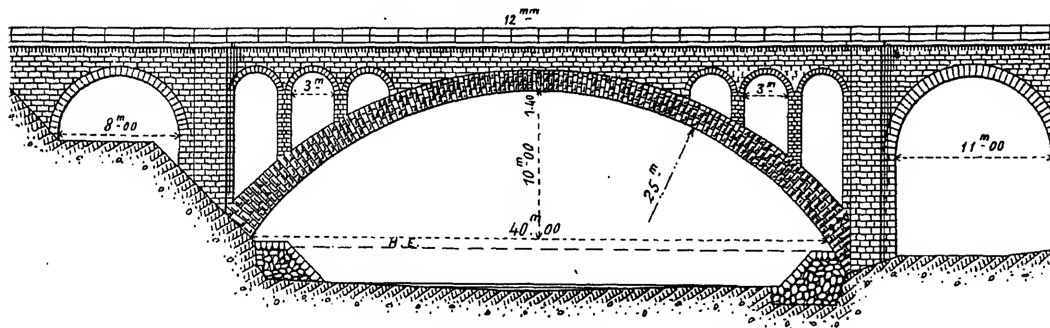
3. — $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant$ 40m) 9, — Tome III.

4. — $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant$ 40m) 10, — Tome III.

f_1. — Ensemble — 1mm (S_1)



f_2[5] — Grande voûte — 2mm



En août 1909, on refaisait la chape : le carton bitumineux employé en 1894 n'avait pas duré.

2. Personnel. — Comme au Pont de Jaremcze[3].

5. — Agrandi d'après S_1. — L'appareil est dessiné d'après Φ_1.

SOURCES :

S, du Pont de Jaremcze, $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr (⩾ 40m)9, p. 117.

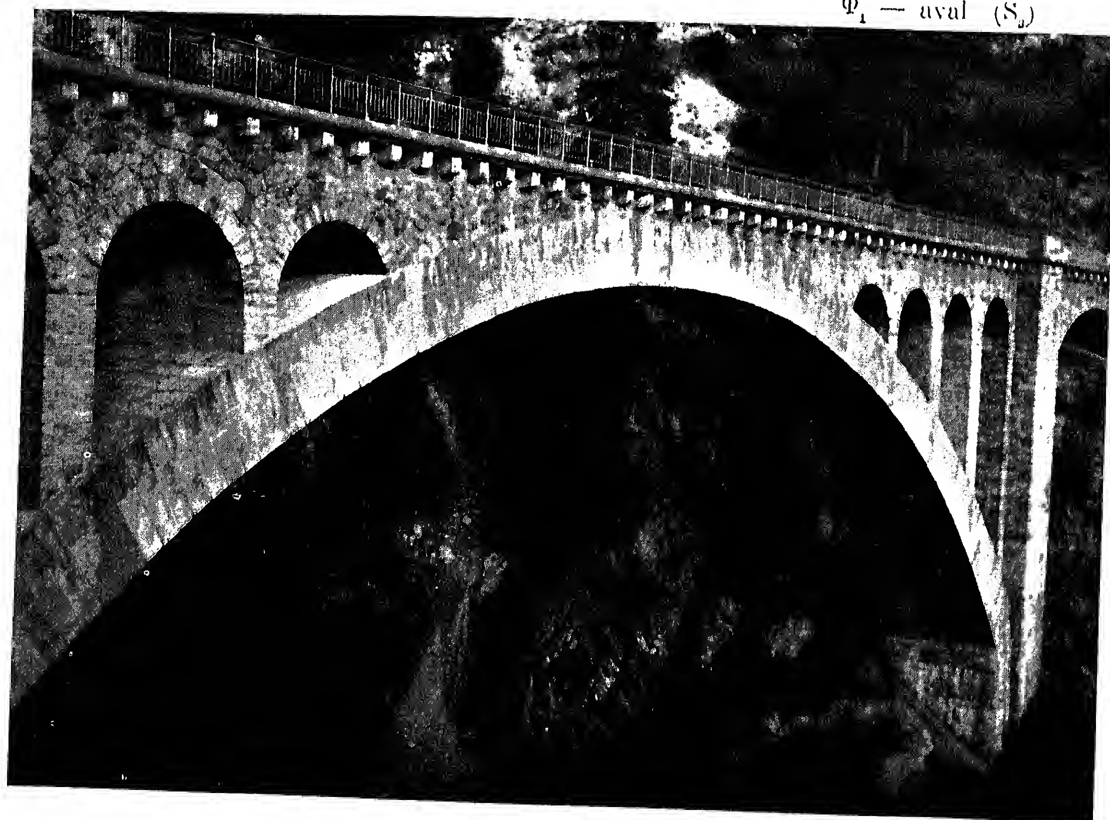
S_2. — Ce que j'ai vu — septembre 1909.

PONT SUR LA GUTACH (*ALLEMAGNE, – Grand Duché de Bade*)

Ligne de Neustadt à Donaueschingen[1]

1899–1900 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ F^r ($\geqslant$ 40m)12

Φ_1 — aval (S_3)



1. Pieds-droits de la grande voûte. — Comme au Pont de Jaremcze[2], dont celui-ci est une réplique, la grande voûte, au lieu de retomber directement sur le sol, porte sur de petits pieds-droits.

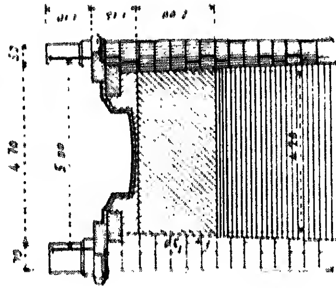
2. Joints de dilatation. — On a ménagé, au-dessus des voûtes d'élégissement voisines des pilastres, des joints verticaux secs j (Γ_4). Ils traversent la plinthe; ils sont prolongés, dans la voûte d'élégissement, par une feuille de plomb disposée suivant un joint normal à l'intrados.

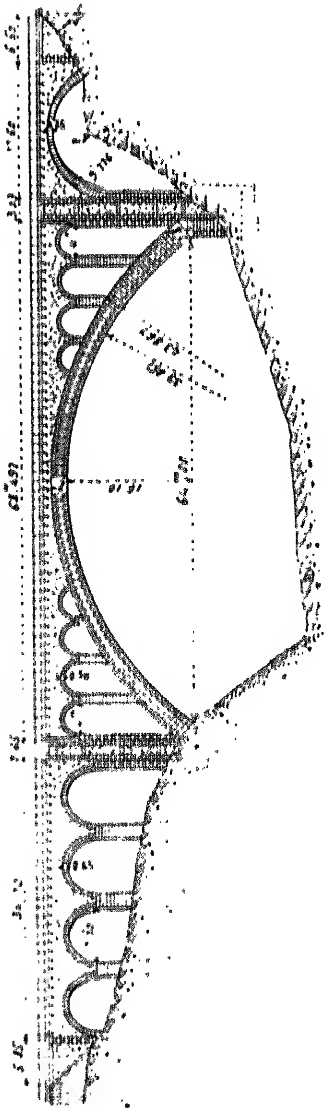
3. Chape. — L'extrados de la grande voûte a été peint à l'huile. La chape est en feuilles de « *Tektolith* ».[3]

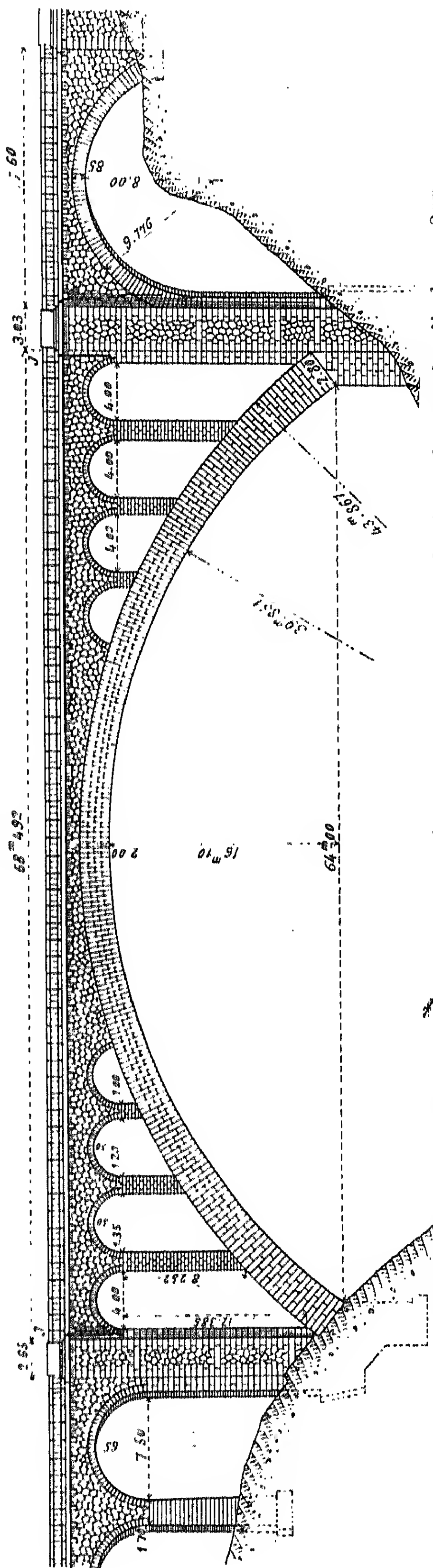
1. — Cette ligne prolonge celle de Fribourg-en-Brisgau à Neustadt, dite « Hœllenthalbahn ». Le pont est entre les stations de Kappel et de Röthenbach, près de celle de Kappel, à environ 39k de Fribourg.

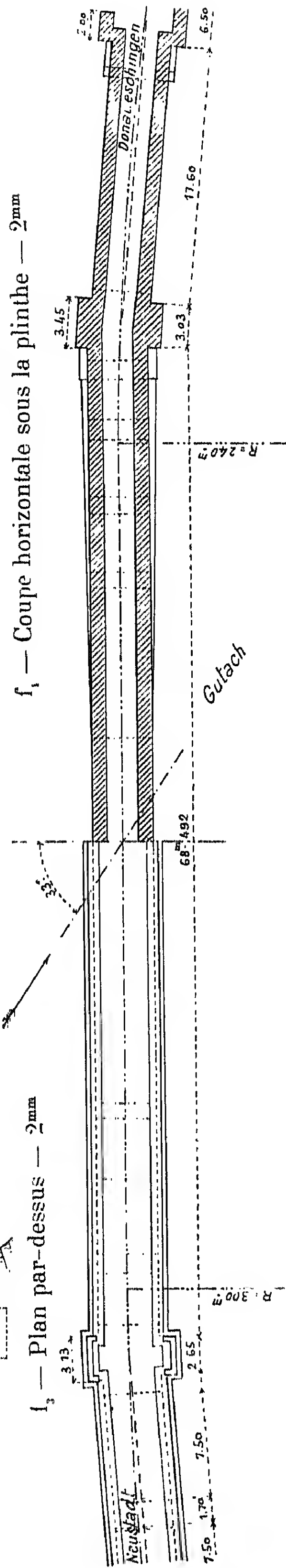
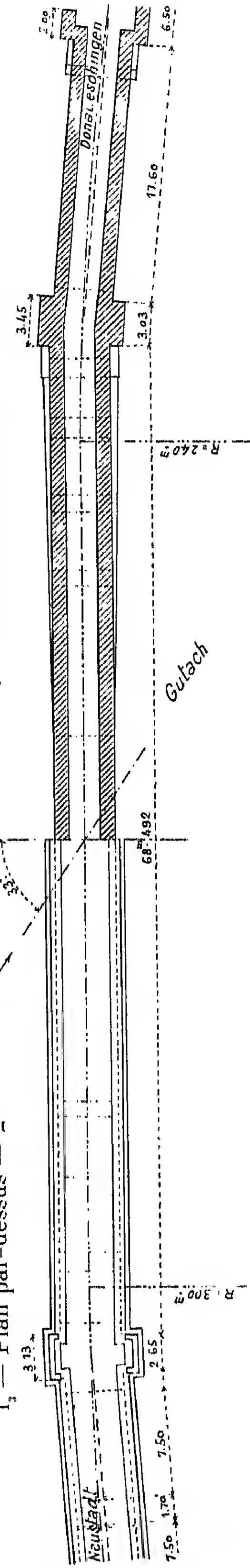
2. — $\widehat{\mathbf{A}}^1$ F^r ($\geqslant$ 40m)9 — Tome III.

3. — Tissu asphalté.


f₅ — Coupe en travers à la clef — 5ᵐᵐ


f₁ — Ensemble — 1ᵐᵐ


f₂ — Grande voûte — 2ᵐᵐ

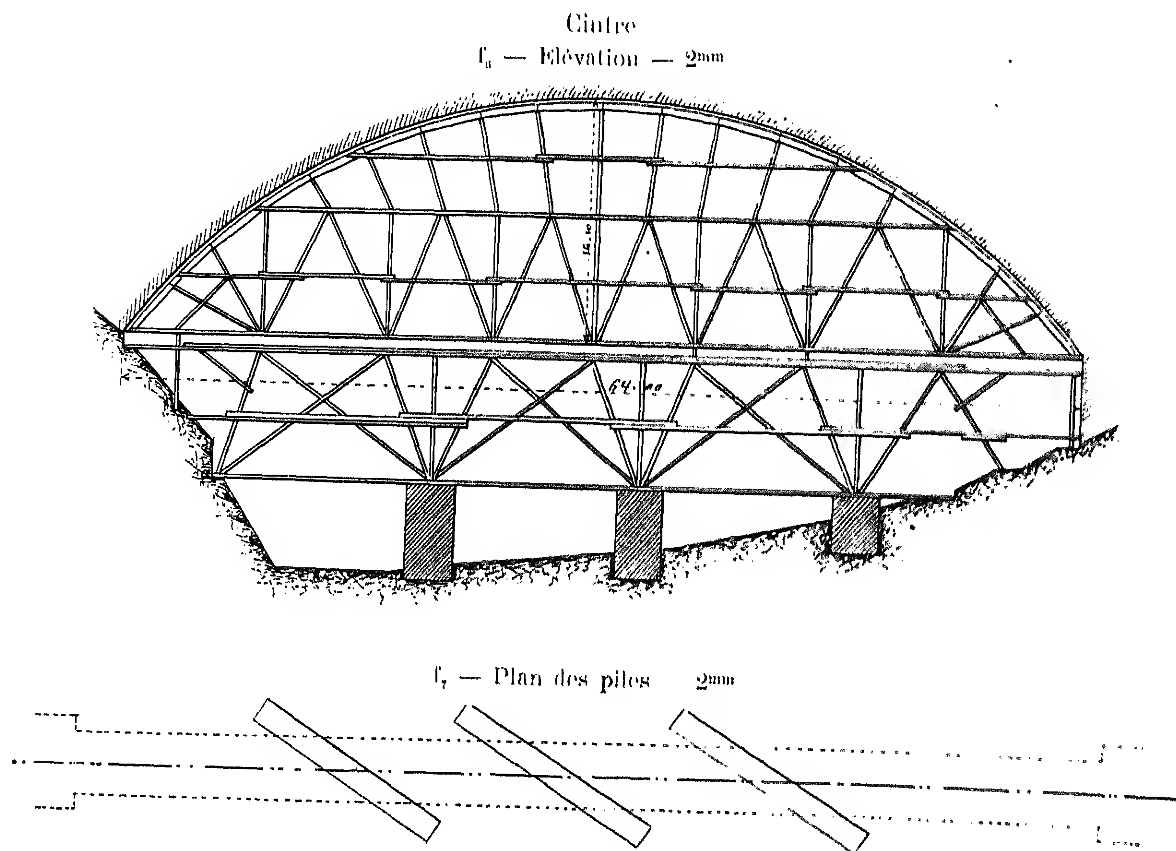



f₃ — Plan par-dessus — 2ᵐᵐ

f₄ — Coupe horizontale sous la plinthe — 2ᵐᵐ

4. Plinthe. — Elle est en encorbellement sur consoles ancrées dans les tympans.

5. Cintre. — Les deux étages supérieurs ont la même disposition qu'au pont de Lavaur[4].



6. Exécution de la grande voute. — « *Comme les constructions...* « *françaises... prises pour modèle* »[5], elle a été faite en deux rouleaux.

Le premier a été construit du 24 septembre au 3 octobre 1899, en 6 attaques. On a posé à sec tous les voussoirs sur liteaux de 15mm à 22mm.

Ses moellons courts avaient la moitié de l'épaisseur totale de la voûte, soit 1m à la clef et 1m40 aux retombées; ses longs dépassaient de 30cm.

Les joints secs ont été matés au mortier de ciment, du 3 au 6 octobre 1899.

Le deuxième rouleau a été construit du 3 au 13 mai 1900 : on matait tous les joints sur la hauteur de ses moellons courts.

4. — Â[1] Fr ($\geqslant$ 40m)[4] — Tome II.

5. — « *Im Einklang mit den œsterreichischen oder vielmehr den französischen Bauausführungen die* « *hierfür vorbildlich waren....* » (S_4, p. 272).

7. Tassements moyens à la clef, comptés à partir du 24 septembre 1899, commencement de la construction du premier rouleau.

	Dates	Tassements en mm		Température de l'air en degrés Celsius
Tassement du cintre	1899			
	3 octobre (avant le clavage du 1er rouleau)	53		»
	1900			
	1er mai (avant la construction du 2e rouleau)	79		»
	14 mai (après la construction du 2e rouleau)	85	Par rapport au 11 juin 1900	»
	9 juin	89		+ 12°
Tassement de la voûte	11 juin	110	—	+ 12°
	22 août	129	19	+ 19°
	30 novembre	141	31	+ 1°
	1901			
	14 février	168	58	— 12°
	10 juillet	150	40	+ 22°

Sans surcharge, la voûte porte 11 tonnes par mètre courant.
A aucun moment, on n'y a observé de fissure.

SOURCES :

S_1. — « Die Fortsetzung der Höllenthalbahn von Neustadt über Löffingen nach Hüfingen », - Karlsruhe, Chr. Fr. Müllers'che Hofbuchdruckerei, 1901, p. 25 à 28, Pl. hors-texte : « *Gutachbrücke* ».

S_2. — La Schweizerische Bauzeitung du 21 décembre 1901 donne, p. 271 à 275, un article de M. R. Moser, Ingénieur en chef : « *Grosse Steinbrücken im Grossherzogtum Baden* » dont les renseignements sont extraits de S_1.

S_3. - Ce que j'ai vu août 1908.

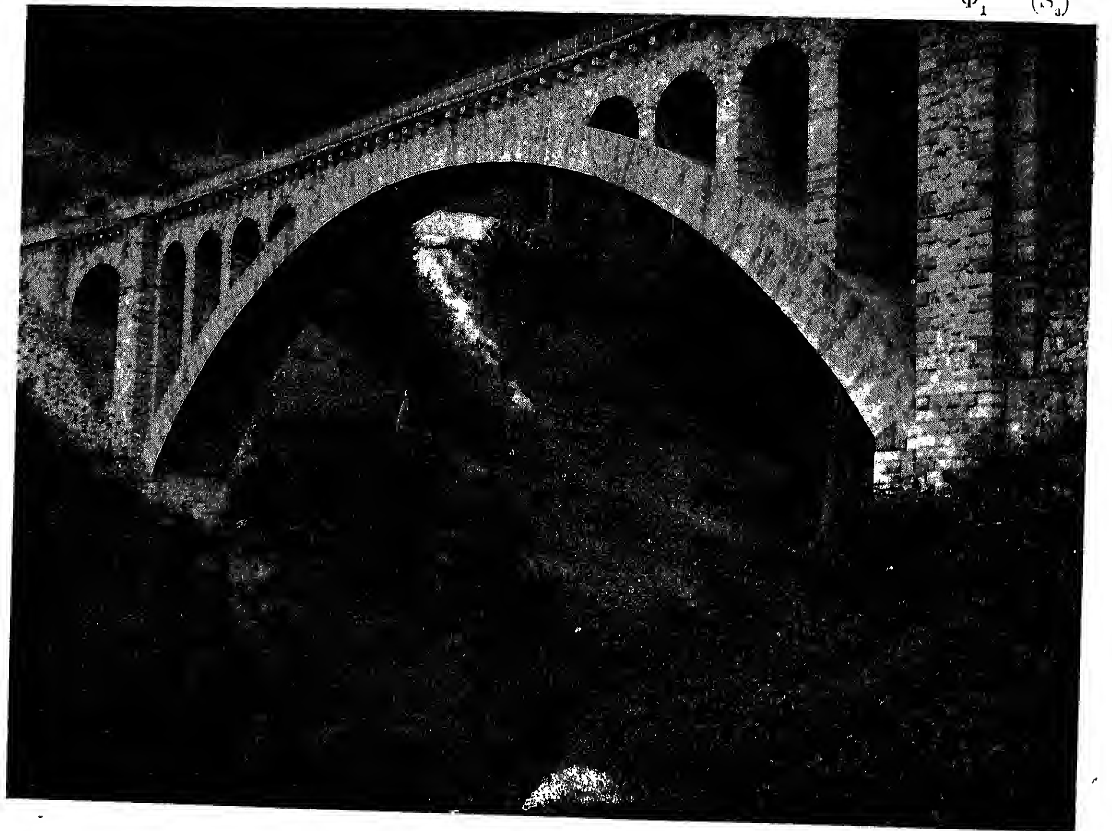
PONT SUR LE SCHWÄNDEHOLZDOBEL

(ALLEMAGNE, — Grand-Duché de Bade)

Ligne de Neustadt à Donaueschingen [1]

1899-1900 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m)13

Φ_1 (S_3)



1. Pieds-droits de la grande voûte. — Comme au Pont sur la Gutach [2], construit en même temps, réplique comme lui du Pont de Jaremcze [3], la grande voûte, au lieu de retomber sur le sol, porte sur de petits pieds-droits.

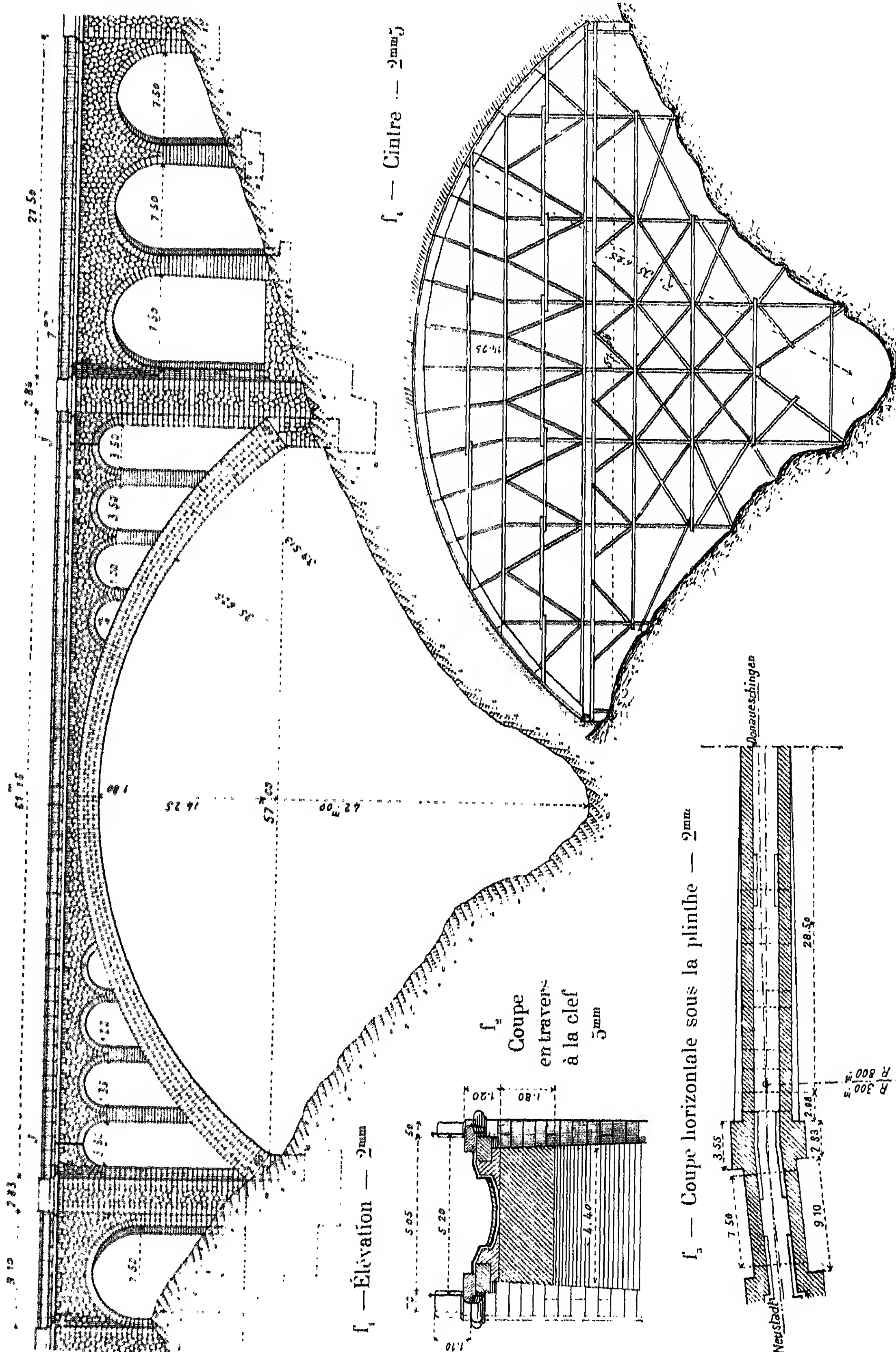
2. Joints de dilatation. — On a laissé vide un joint vertical j (f_1), depuis la clef de la voûte d'évidement voisine du pilastre, jusqu'à la plinthe.

3. Plinthe. — Elle est en encorbellement sur consoles ancrées dans les tympans.

1. — Le pont est entre les stations de Kappel et de Röthenbach, à 1k5 environ du pont sur la Gutach $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m)12.

2. — $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m)12 - Tome III.

3. — $\widehat{\mathbf{A}}^1$ Fr ($\geqslant$ 40m)9 - Tome III.


f1 — Élévation — 2mm
f2 Coupe en travers à la clef 5mm
f3 — Coupe horizontale sous la plinthe — 2mm
f4 — Cintre — 2mm
Donaueschingen
Neustadt
57.00
62.00

4. Cintre (f_4). — Les deux étages supérieurs ont la même disposition qu'au pont de Lavaur [4].

5. Exécution de la grande voûte. — Même mode de construction qu'au pont sur la Gutach [5] : deux rouleaux avec découpe de 0m30.

6. Dates.

1er rouleau	Construction	23-30 avril 1900
	Clavages	30 avril - 2 mai 1900
2e rouleau		23 mai - 1er juin 1900

7. Tassements moyens à la clef, comptés à partir du 25 avril 1900, pendant la construction du premier rouleau.

	Dates	Tassements en *mm.*	Par rapport au 13 juillet 1900	Température de l'air en degrés Celsius
	1900			
Tassement du cintre	6 mai (après clavage du 1er rouleau)	66		»
	21 mai (avant construction du 2e rouleau)	79		»
	1er juin (après construction du 2e rouleau)	87		+ 15°
	13 juillet (avant décintrement)	99		+ 20°
Tassement de la voûte	13 juillet (après décintrement)	120		+ 20°
	3 novembre	172	52	+ 10°
	1901			
	14 février	200	80	— 17°
	10 juillet	183	63	+ 25°

On n'a pas constaté de fissure dans la voûte.

4. — $\widehat{A}^1$ Fr (⩾ 40m)4 - Tome II. 5. — $\widehat{A}^1$ Fr (⩾ 40m)12 - Tome III.

SOURCES :

S1. — « Die Fortsetzung der Höllenthalbahn von Neustadt über Löffingen nach Hüfingen », Karlsruhe, Chr. Fr. Müllers'che Hofbuchdruckerei, 1901, p. 28 à 30, Pl. hors-texte : « *Die* « *Schwändeholzdobelbrücke* ».

S2. — La Schweizerische Bauzeitung du 21 décembre 1901 donne, pages 271 à 275, un article de M. R. Moser, Ingénieur en chef : « *Grosse Steinbrücken im Grossherzogtum Baden* », dont les renseignements sont extraits de S1.

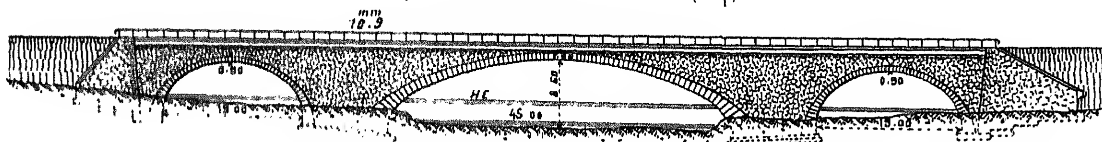
S3. — Ce que j'ai vu — août 1908.

PONT SUR LA CHEMNITZ (SAXE)

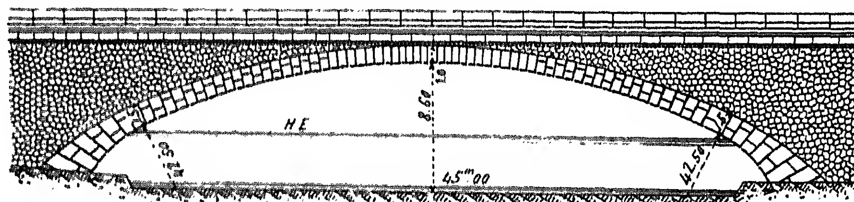
Ligne[1] de Chemnitz à Wechselburg[2]

1901-1902 $\widehat{A}^1$ I^{r} ($\geqslant$ 40m) 14

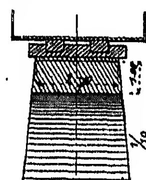
f_1 — Ensemble — 1mm (S'₁)



f_2 — Grande voûte[3] — 2mm (S'₁)



f_3 — Coupe en travers à la clef — 4mm (S'₁)



Φ_1 (S''₁)



1. Dispositions à signaler.

— L'ouvrage traverse en biais la Chemnitz (S''₁).

Il n'a que 2m70 de largeur en haut.

Le parapet et les trottoirs sont en encorbellement. On a simulé des bandeaux avec un crépi jouant le granit; la douelle est barbouillée de mortier (S''₁).

2. Personnel.

Exécution : MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

1. — d'intérêt local à voie normale.

2. — au point 21k647 de la ligne.

3. — La portée est 46m d'après S''₁.

SOURCES :

S₁. — Dessins (S'₁) et album (S''₁) qu'a bien voulu me remettre M. Liebold, en 1908.

PONT SUR LE TORRENT DIVERIA *(ITALIE, — Province de l'Ossola)*

Ligne de Domodossola à Iselle[1] *(Descente du Simplon à Milan)*

1902 $\widehat{\mathbf{A}}^{1}$ Ier (= 40^{m})15

Φ_1 (S.)



1. Quelques observations. — Le pont traverse en biais le torrent : on l'y entonne par de longs guideaux.

Les guideaux, tympans, piédroits, plinthes, pilastres, sont en granit ; la voûte est en briques.

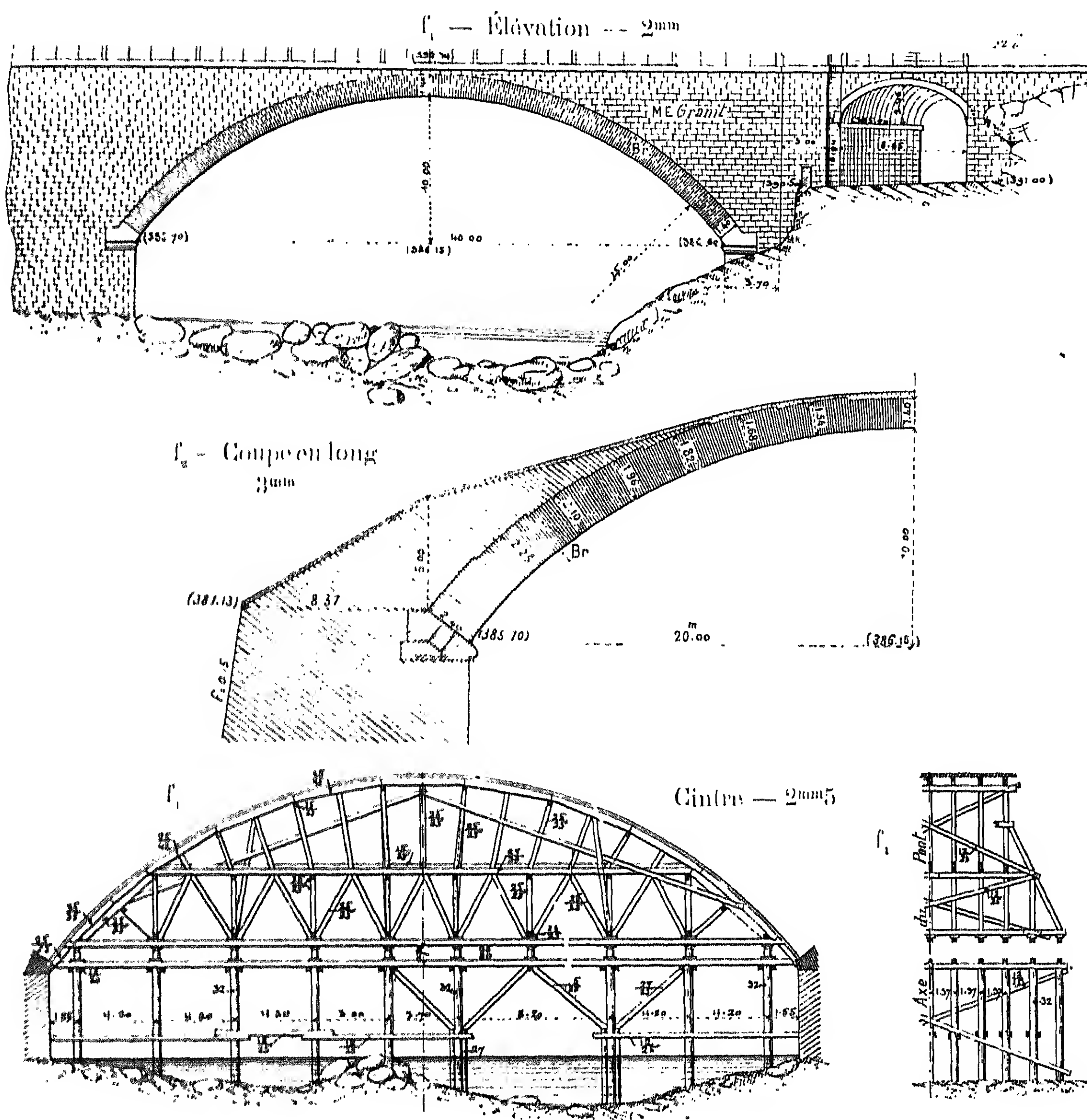
La plinthe paraît maigre.

2. Cintre.

Pieux	117^{m3}
Fermes	150
Brise-lame	7
Contreventement transversal	39
Platelage	42
En tout	355^{m3}

3. Dates. — La voûte fut commencée dans les premiers jours de mai 1902, terminée vers le milieu de juillet.

1. — au P^{t}. 6^{k}911^{m} de cette ligne, entre les stations de Varzo et Preglia, à 3^{k}1 environ en amont de Preglia.



4. Personnel[2].

Projet : M. Guiseppe Oliva, alors Directeur du Service de la Construction et de l'Entretien de la Société des Chemins de fer de la Méditerranée ; depuis, Directeur Général de cette Société.

Exécution en régie.

2. — Indication gracieusement donnée par M. Edouard Garneri, Chef du Service de l'Entretien des Chemins de fer de l'Etat, à Bologne.

SOURCES :

S_1. — Societa Italiana per le Strade Ferrate del Mediterraneo. — Servicio delle Costruzioni : « *Relazione sugli Studi e Lavori eseguiti dal 1897 a 1905* », - texte : chapitre II, pages 99 et 100 ; - dessins : tav. XVII, - Rome 1906.

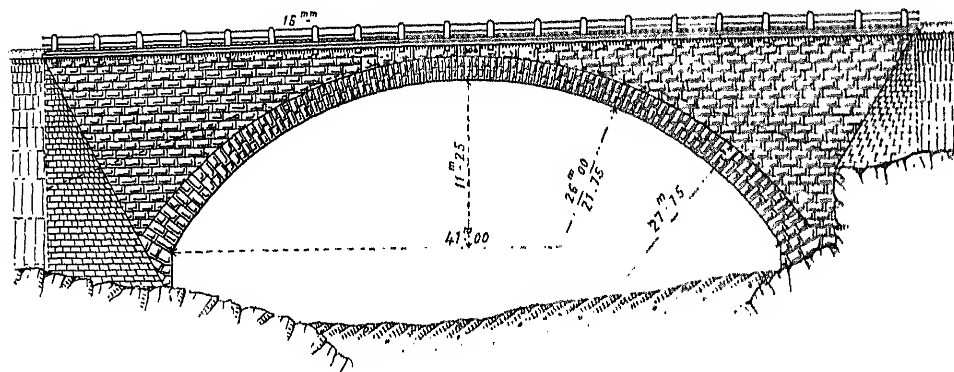
S_2. — Ce que j'ai vu — juillet 1908.

PONT SUR LE STRANDEELVEN, PRÈS DE VOSS (NORVÈGE)

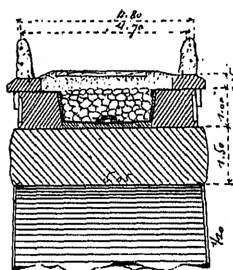
Chemin de fer de Christiania à Bergen

1902-1904 $\widehat{A}^1$ Fr (40m,16

f_1 — Élévation — 2mm



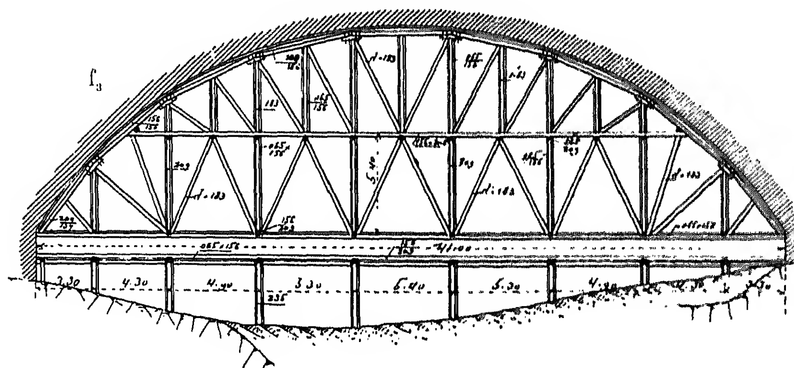
f_2 — Coupe en travers à la clef — 5mm

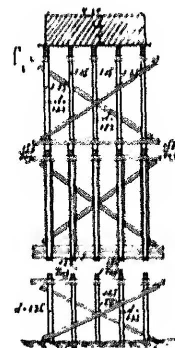


1. Dates.

Commencement des travaux.....	automne 1902
Construction de la voûte.........	6 août — 22 septembre 1903
Décintrement....................	14 septembre 1904
Ouverture à la circulation........	octobre 1904

Cintre — 2mm5





2. Personnel.

Projet : Service de la Construction des Chemins de fer de l'État norvégien.

Direction des Travaux : L'Ingénieur en Chef du Chemin de fer de Bergen (partie ouest).

Φ_1 (S_1)



SOURCE :

S_1. Dessins d'exécution, renseignements et photographies qu'a bien voulu me communiquer la Direction des Chemins de fer norwégiens, sur la gracieuse intervention de M. E. A. H. Sinding, Directeur de l'École Polytechnique de Christiania, — mai 1911.

PONT SUR LE KRENNGRABEN PRÈS DE DIRNBACH[1] (*Haute-AUTRICHE*)

Ligne de Klaus-Steyrling à Selzthal (Pyhrnbahn)

1904–1905 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ F^r ($\sim$ 40m) 17

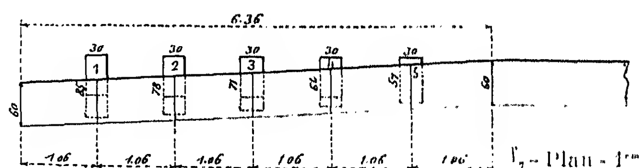
Φ_1 (S_4)

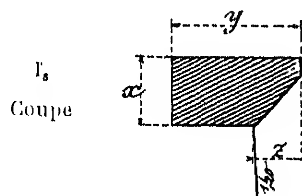


1. Dispositions en vue de la courbe[2] du tracé. — Les têtes sont planes.

A la tête du côté du centre, la plinthe est en ligne brisée. Les côtés extrêmes sont posés sur 5 corbeaux (Φ_1, f_1, f_7, f_8), dont voici les dimensions :

Corbeaux



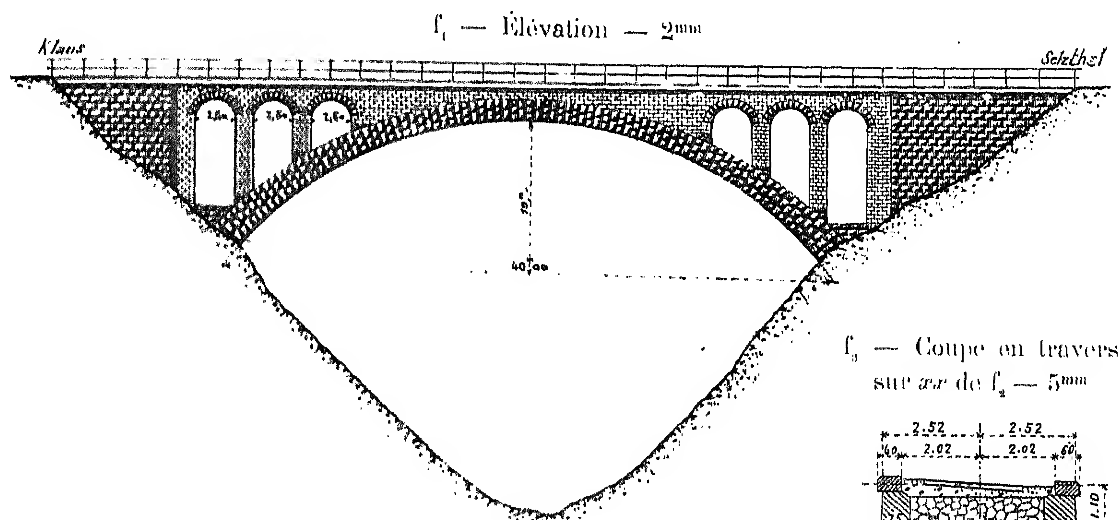


Nos	x	y	z
1	45c	85c	31c
2	40	78	24
3	35	71	18
4	30	64	11
5	25	57	4

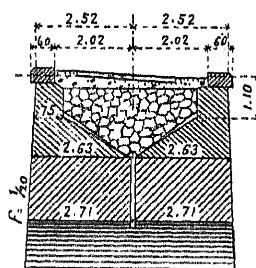
1. — entre la station de Dirnbach et la halte de St. Pankraz.

2. — Sur S'_4, le rayon n'est pas coté. — D'après les ordonnées de la courbe, il est d'environ 320m.

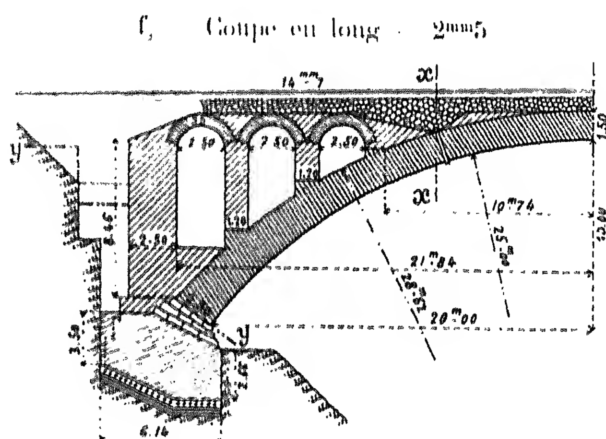
f₁ — Élévation — 2mm



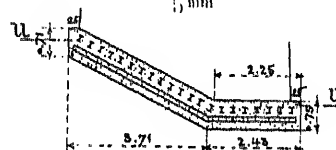
f₃ — Coupe en travers sur *xx* de f₂ — 5mm



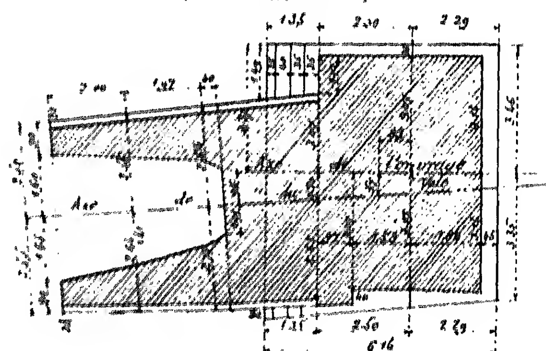
f₂ — Coupe en long — 2mm5



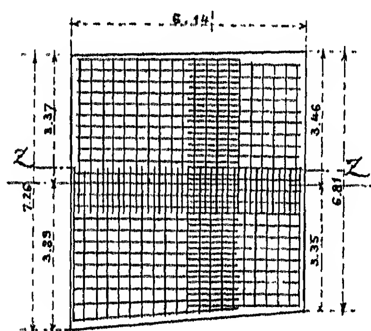
Dalle en béton armé
f₅ — Coupe sur *zz* de f₆
5mm



f₄ — Coupe sur *yy* de f₂ — 5mm



f₆ — Coupe sur *uu* de f₅ — 5mm



2. Viaduc d'évidement. — Les bandeaux et la douelle sont en calcaire ; les piles et tympans, en béton moulé (S_4).

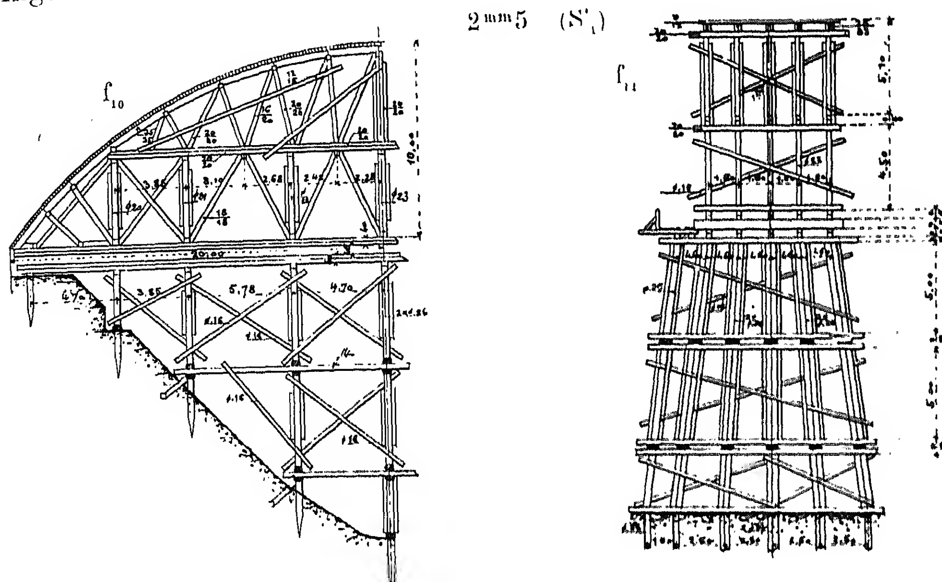
Les crossettes d'appui des piles, en granit, dépassent l'extrados de la grande voûte : elle n'est pas entamée.

3. Aspect. — Il y a trop de tympan au-dessus de la clef.

Les piles d'élégissement sont trop épaisses (1m20 pour une portée de 2m50).

4. Cintre. — On a inauguré là le mode de décintrement inventé par M. l'Ingénieur en chef Zuffer [3].

2mm5 (S'_1)



Il n'a fallu que deux traits de scie pour détacher le cintre (S_4).

5. Dates.

Fondations	1904
Grande voûte	1905
Ouverture à la circulation	novembre 1905

6. Personnel (S''_1).

Ingénieurs : *Projet et Direction des Travaux* : Service de la Construction des Chemins de fer de l'Etat.

Direction générale à Vienne : M. J. Zuffer, Directeur du Service.

Direction locale à Windischgarsten.

Entrepreneurs : MM. E. Prost et Cie, à Vienne.

3. — décrit dans la monographie du Pont sur le Palmgraben $\widehat{A}^1$ Fr (> 40m) 8 — Tome II.

SOURCES :

S_1. — Dessins (S'_1) et renseignements (S''_1) que m'a gracieusement communiqués le Ministère des Chemins de fer, à Vienne, sur la demande qu'en a bien voulu faire l'Ambassadeur de France à Vienne, M. Philippe Crozier.

S_2. — Geschichte der Eisenbahnen der œsterreichisch-ungarischen Monarchie, VI Band, 1898-1908, II Band. « *Der Brückenbau der neuen Alpenbahnen. — A. Steinbrücken* », Josef Zuffer, p. 74 à 87.

S_3. — Zeitschrift des œsterreichischen Ingenieur-und Architekten Vereines, 1908, p. 174 à 176 : « *Die Ausrüstung der grossen Wölbbrücken im Zuge der neuen Alpenbahnen* », J. Zuffer, K. K. Ober-Baurat.

S_4. — Ce que j'ai vu — août 1909.

PONT SUR LA STEYRLING *(Haute-AUTRICHE)*

Ligne de Klaus-Steyrling à Selzthal[1] *(Pyhrnbahn)*

1904-1905 $\widehat{\mathbf{A}}^1$ F^{er} $(\geqslant 40^m)$ 18

Φ₁ — amont (S₁)



1. Tympans. — Les voûtes d'évidement sont, comme leurs piles, en béton moulé.

Ces piles sont trop épaisses : pour 3m25 de portée, 1m45, 1m40, 1m35, 1m25.

Il y a trop de plein au-dessus des petites voûtes.

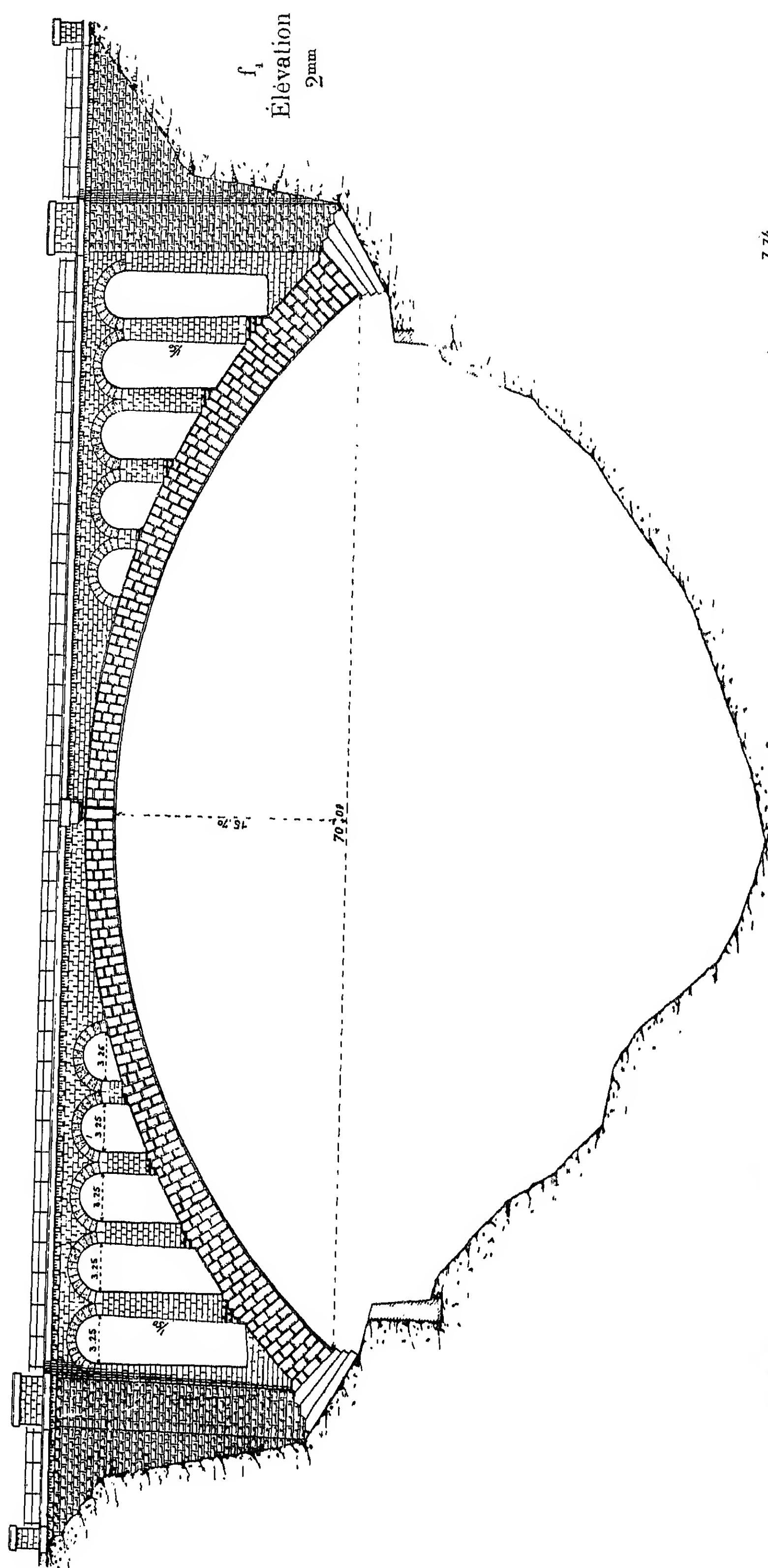
Les corbeaux sous la plinthe ne saillent pas assez.

2. Cartouche de clef (S₁). — Le refuge au-dessus de la clef porte, sur granit poli, cette inscription :

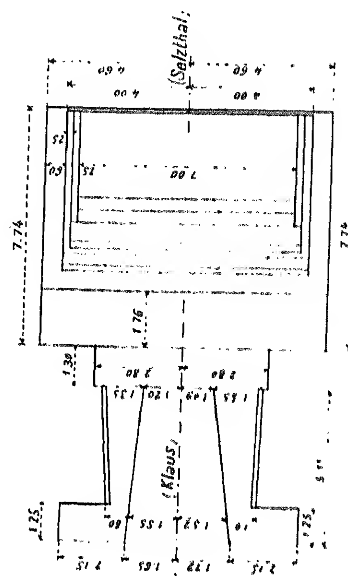
Steyrling
Brücke
erbaut
1905

On aurait pu la mieux placer.

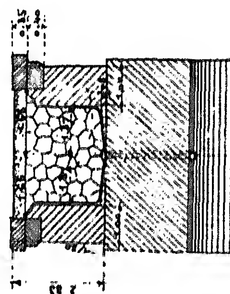
1. — Entre les stations de Klaus et Steyrling, tout près de la station de Steyrling.



f1 Élévation 2mm

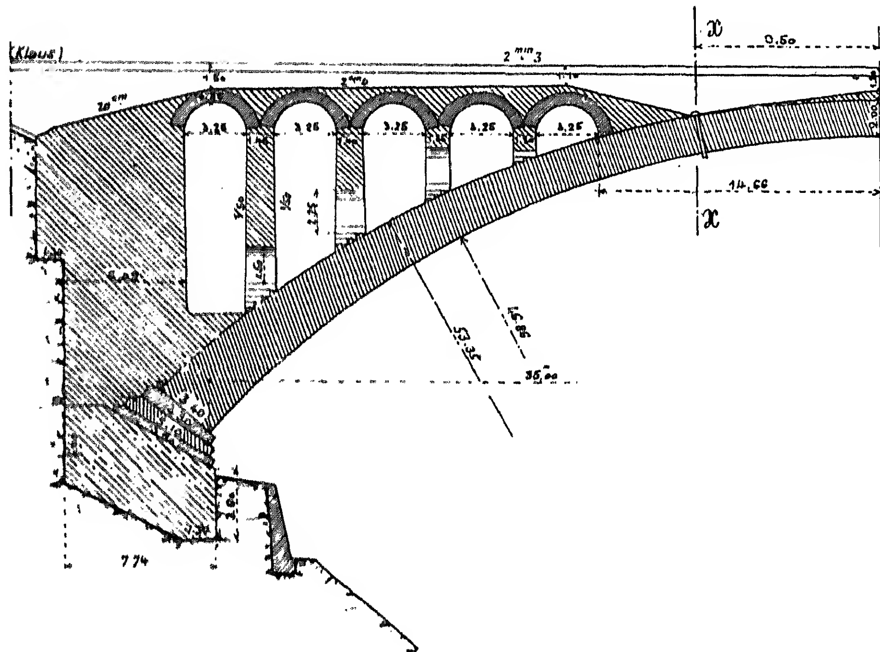


f1 Coupe horizontale de la culée Klaus 1mm



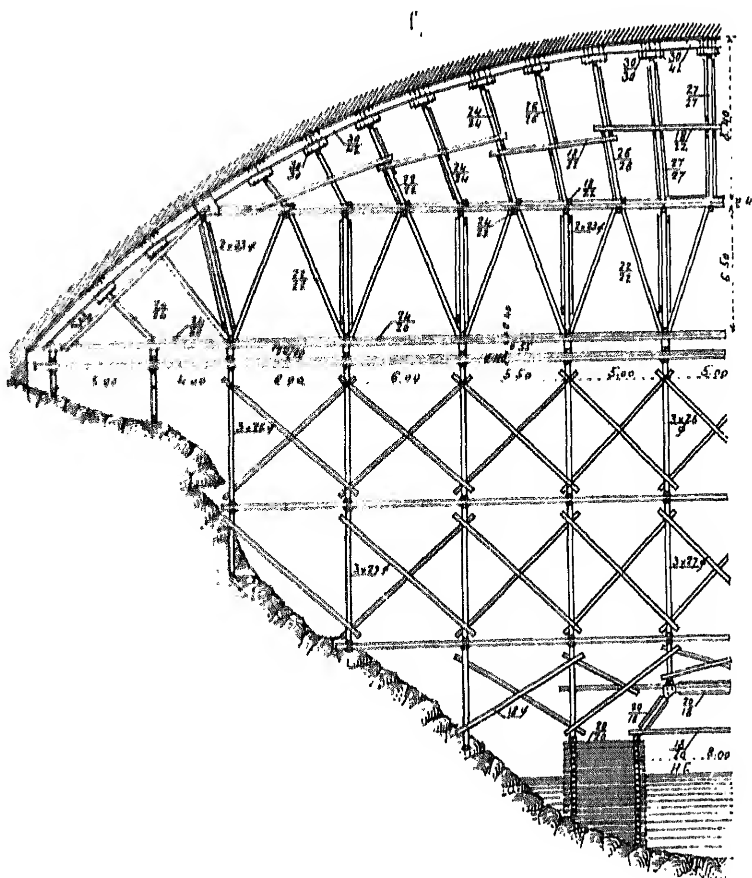
f2 Coupe en travers sur axe de f1 5mm

f₁ — Coupe en long — 2mm5

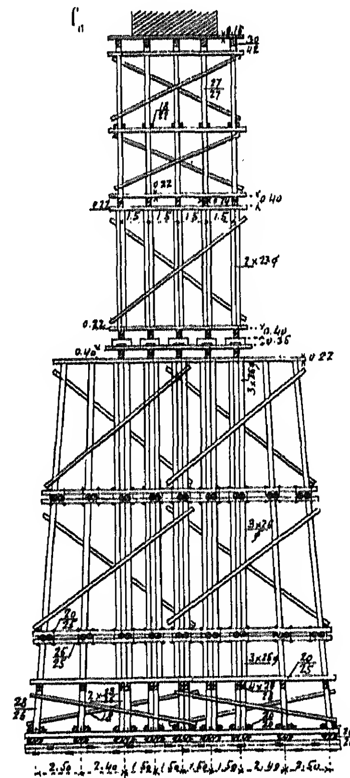


Gintre — 2mm5 (S₃)

f₁



f₂



Φ₂ (S₄)



3. Dates.

Commencement des travaux	été 1904
Grande voûte	automne 1904 — printemps 1905
Ouverture à la circulation	19 novembre 1905

4. Personnel (S"₁).

Projet et Direction des Travaux : Comme au Pont sur le Krenngraben [2].

Entrepreneur : MM. E. Gross et C[ie].

2. — Â[1] F[r] (≥ 40m)17, - Tome III.

SOURCES :

S₁, S₂, du Pont sur le Krenngraben Â[1] F[r] (≥ 40m)17.

S₃. — Dessins du cintre, gracieusement communiqués par M. H. Studer, Ingénieur des chemins de fer rhétiques, à Zuoz (Engadine), — novembre 1912.

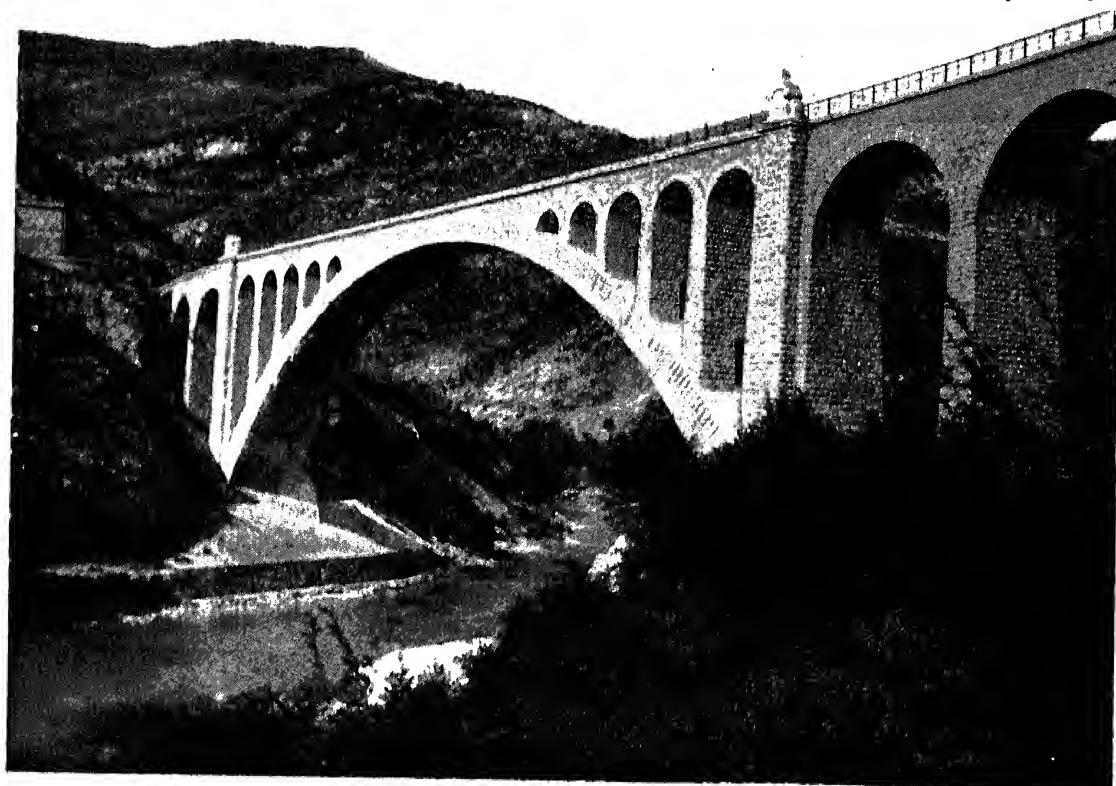
S₄. — Ce que j'ai vu — août 1909.

PONT SUR L'ISONZO, PRÈS DE SALCANO[1] (AUTRICHE, — *Küstenland*

Ligne d'Assling (Carinthie) à Trieste, par Goritz[2] — *Wocheinerbahn*

1904-1906 $\widehat{A}^1$ Fr (· 40m) 19

Φ_1 (S'_4)



1. Pourquoi on a fait un pont en maçonnerie (S_0). — Un pont métallique était cher à monter, difficile à remplacer.

2. Pourquoi on a fait une voûte de 85m. — On avait d'abord projeté une voûte de 80m. En 1904, on en commença les fouilles. Mais sous le conglomérat dur de la surface, on trouva : à gauche, du sable, — à droite, un éboulis argileux[3].

Après avoir reconnu le sol par des puits et une galerie de sondage, on déplaça la culée gauche (Goritz) de 14m en amont sur le conglomérat, et on conserva la culée rive droite.

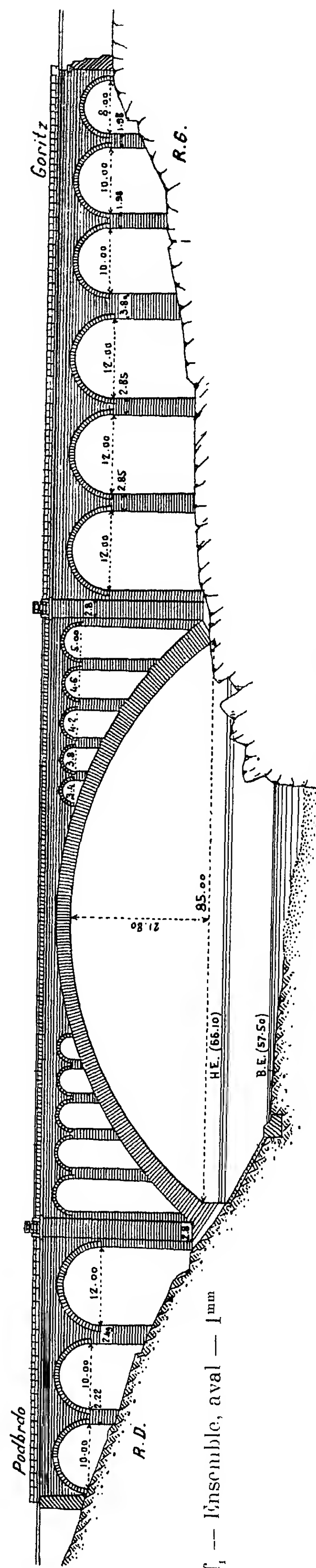
L'ouverture de la voûte fut ainsi portée à 85m (S_1).

3. Aspect (S_1). — L'ouvrage est bien et simplement traité.

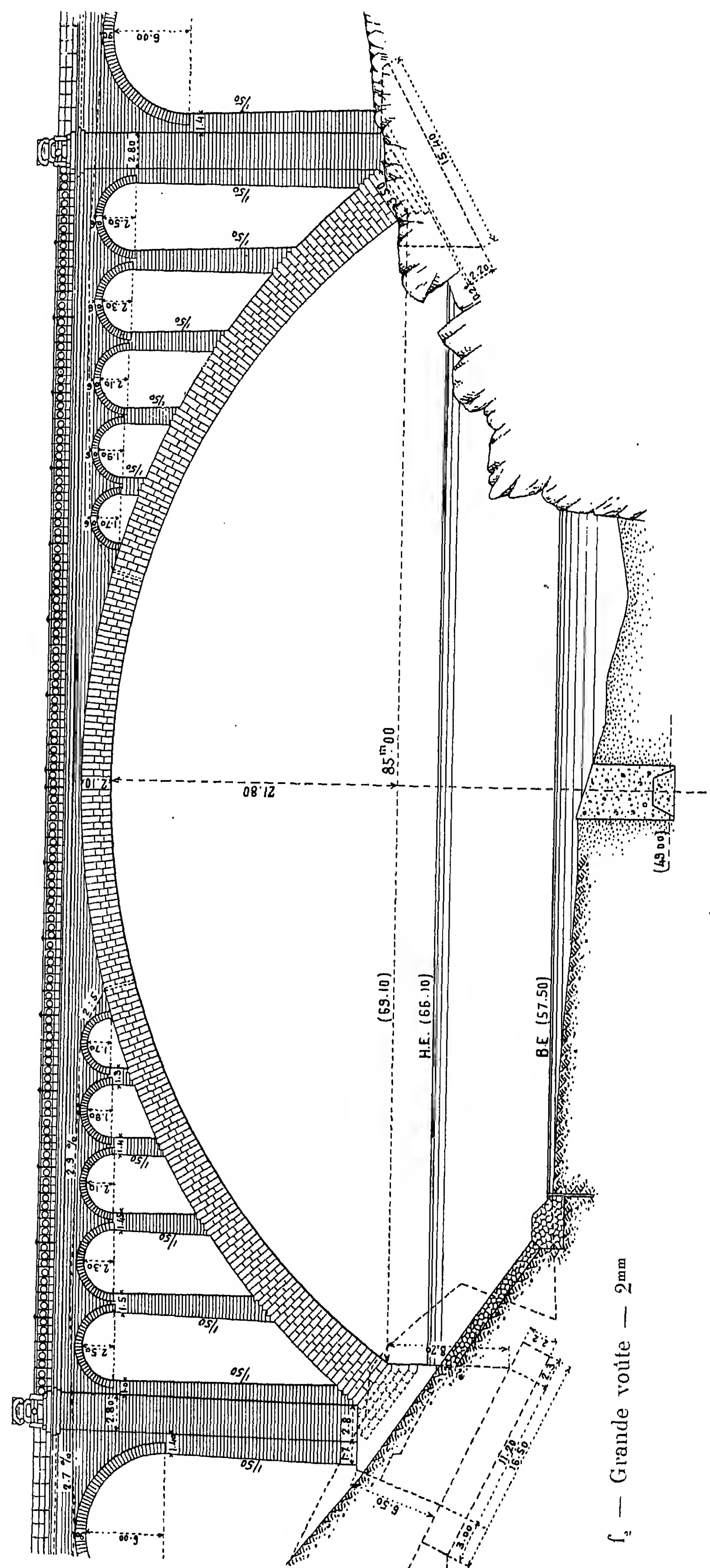
Le corps central est en calcaire blanc ; les viaducs d'accès sont en calcaire gris-bleuâtre, à parements moins soignés.

1. Près de Goritz, entre le « Staatsbahnhof » de Goritz et la station de Plava.

2. En allemand : *Görz*. 3. — « *Lehmiges Bergschüttmaterial* ».

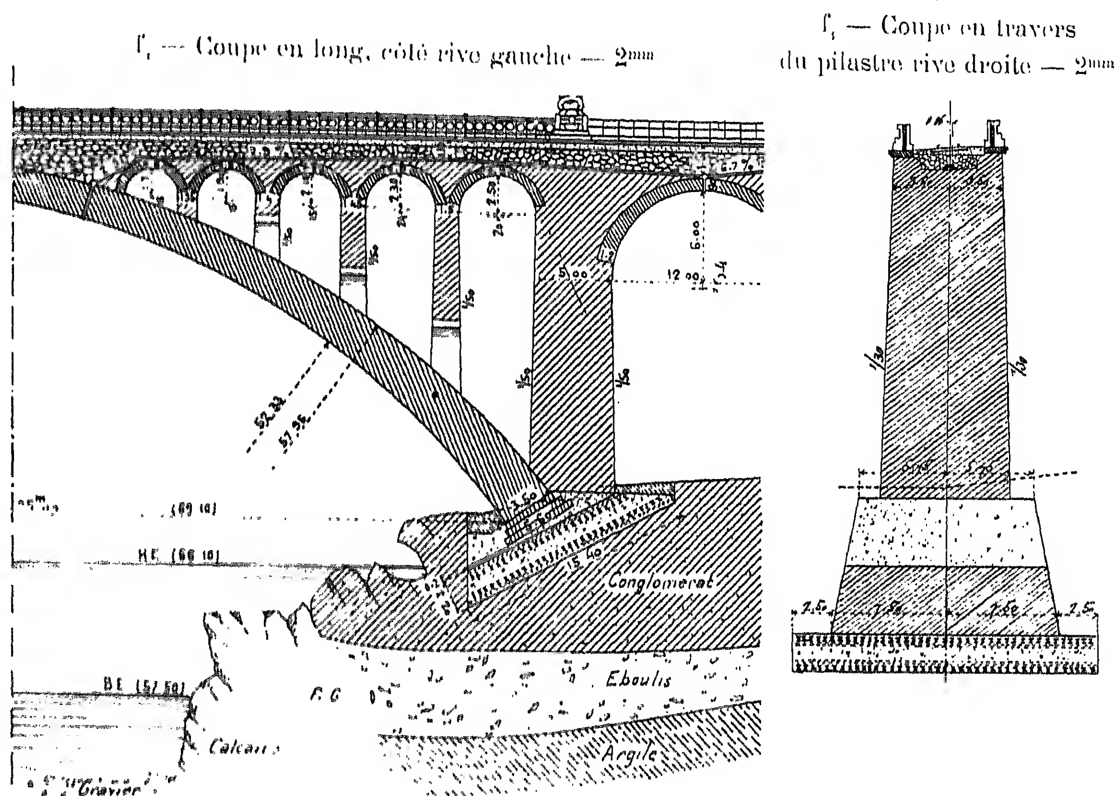


f1 — Ensemble, aval — 1mm



f2 — Grande voûte — 2mm

Les pilastres qui encadrent la grande voûte sont secs, maigres, assez pauvrement couronnés.



Γ_1 — Coupe en long, côté rive gauche — 2mm

Γ_1 — Coupe en travers du pilastre rive droite — 2mm

La plinthe de la grande voûte pourtourne les pilastres, au lieu de s'y arrêter.

Son garde-corps, bien que plus étoffé, se voit à peine.

Le viaduc de rive gauche a, entre les voûtes de 10m et 12m, une pile plus épaisse que les autres, sans contrefort ou saillie qui la distingue des voisines.

4. Chape (S_7). — La même qu'au Pont sur le Palmgraben[1].

5. Joints de dilatation (S_8). — Les deux dernières voûtes d'évidement retombent sur une couche d'amiante de 9mm entre deux voussoirs à surface polie ; le tympan au-dessus est coupé par un joint vertical de feutre asphalté, caché aux têtes par du mortier, lequel s'est fissuré.

Au-dessus, la chape est recourbée : elle peut ainsi s'étendre sans se fendre.

A la fin de 1909, on n'avait pas observé de fissures dans les tympans.

6. Matériaux. — *A. Grande voûte* (S_1). — Elle est tout entière en pierre de taille de calcaire de Nabresina (résistant à 1200k en cubes de 6cm), à mortier de ciment à 1v 3v.

1. — Â¹ Fr (40m) 8. — Tome II.

Les efforts maxima sont :

Clef	28^k
Naissances	40^k
Joints de rupture	51^k

soit, par rapport à la résistance en cubes de 6^{cm}, un coefficient de sécurité de 23 [5].

B. Autres parties de l'ouvrage (S_1). — Sauf dans la grande voûte et les gradins des appuis, les maçonneries sont à mortier de ciment à 1/5, et moellons ordinaires, assisés en parement.

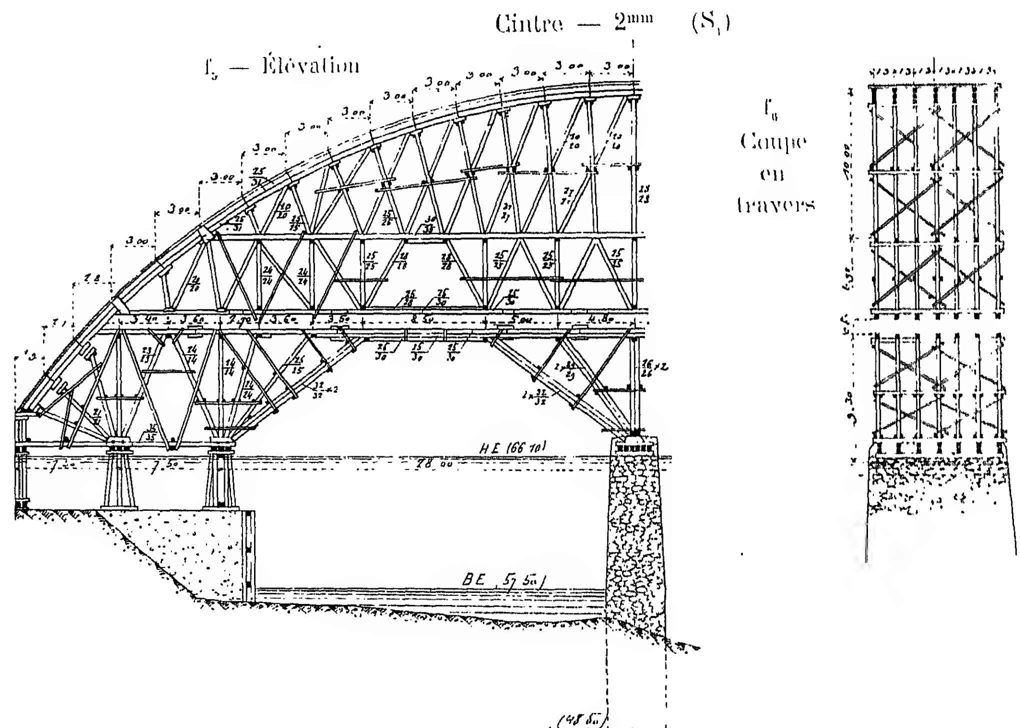
7. Cintre.

— On n'osa pas retrousser le cintre entre les deux berges. D'autre part, dans un torrent à crues de 8^m60 [6], on ne pouvait pas l'appuyer sur une palée en bois ; on le soutint en son milieu par une pile en maçonnerie fondée à l'air comprimé, sur caisson en mélèze, encastré de 0^m50 dans le schiste, à 9^m sous l'étiage. On la fit sauter à la mine, l'ouvrage fini (S_2).

C'était, pourtant, la fondation toute faite d'un pont à deux arches.

Sur berges, le cintre s'appuyait sur des socles en béton.

Cintre — 2^{mm} (S_1)



5. — Soient : k_1, la résistance d'une pierre taillée en cubes,
k_2, celle du mortier,
K, la résistance sur laquelle on peut compter pour la maçonnerie.

On a proposé la formule :

$$K = 1/3\ k_1 + 2/3\ k_2$$

formule indiquée dans la Zeitschrift für Architektur- und Ingenieurwesen, 1907, p. 403 à 440 : « *Über weitgespannte Wölbbrücken* » — Karlsruhe, mai 1907, - Dr Ing. Fr. Engesser, - p. 426.

Elle donne ici 570^k, soit un coefficient de sécurité de 11 (S_1).

6. — L'Isonzo monte de 8^m en quelques heures (S_6).

Pendant qu'on fondait la pile du cintre, il y eut, de mai à décembre 1904, 6 crues de plus de 3^m50. Le 24 juin, le bateau installé pour battre les pieux fut coulé ; le 14 septembre, une partie de l'échafaudage fut emporté, un charpentier tué ; le 24 novembre (crue de 6^m), l'échafaudage, le sas à air, la grue, furent emportés (S_6).

On soigna les assemblages (tenons et mortaises), et on boulonna tous les croisements (S_1).

Φ_2 — amont (S''_3)



Comme on ne comptait pas construire par rouleaux, le cintre a été calculé pour « *presque tout le poids de la voûte* » (S_1), avec un travail maximum de 60^k (S_1).

8. Fondations (S_1). — On rencontra dans le conglomérat de rive gauche des fissures et des cavernes qu'on bourra de béton à 1 12.

Pour ne pas dépasser 4^k, on établit, au fond de chaque fouille, une dalle en béton à 1 2 3 (S_1) de 2^m20 d'épaisseur, ayant, à la rive gauche, $15^m4 \times 14^m5$, — à la rive droite, $20^m \times 16^m5$, armée de 4 cours de fers en I croisés, badigeonnés au préalable d'un lait de ciment.

Il y a, dans les deux dalles, 100 tonnes de fer.

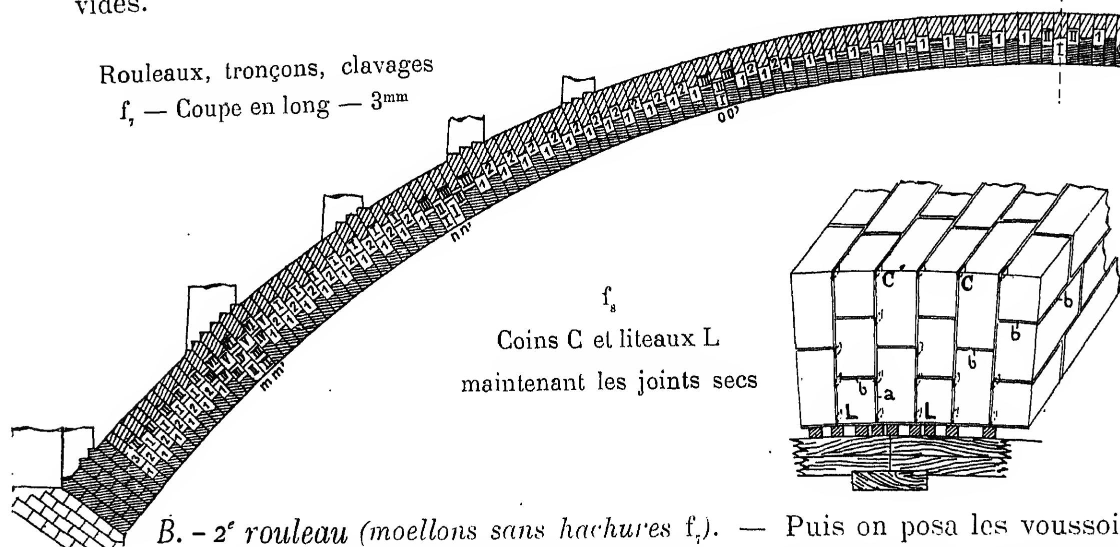
La pression de la voûte est étalée sur les dalles en béton par 3 assises de pierre de taille en gradins.

On eut soin de murailler et de bétonner (béton à 1 12) la fouille abandonnée de la culée rive gauche, et on en protégea le pied.

9. Exécution de la grande voûte (S_1). — *A. - 1er rouleau (hachures serrées, f_2).* On posa sur le cintre, à sec, tous les moellons de douelle ; on les répartit par des taquets en 8 tronçons [7] (S_3).

7. - La pierre taillée avec soin, glisse sur le platelage à partir de 55° sur la verticale.

Les joints de 16^{mm} [8] (S_3), étaient maintenus par des coins C (f_8), et des liteaux L (S_1). On les mata tous au mortier de ciment Portland [9] à 1/3, à l'état de terre humide [10], avec des spatules en fer [11] (S_1), les intervalles des taquets demeurant vides.

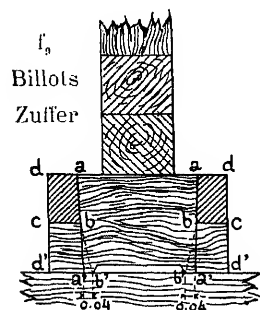


B. - 2e **rouleau** *(moellons sans hachures f_7).* — Puis on posa les voussoirs 1, 2 (f_7) sur lits de mortier dans les joints *b* (f_8), en matant les joints montants *a* (f_8).

Après prise, on clava à la fois les deux rouleaux, aux taquets *mm'*, *nn'*, *oo'*, par les moellons I et II (f_7) (S_1). On posa en même temps le queutage dans l'ordre I à VI (f_7) (S_1).

C. - 3e **rouleau** *(hachures espacées f_7).* — On posa les voussoirs et on mata aussitôt les joints « *sans s'astreindre à aucun ordre* » (S_1).

10. Décintrement. — Les billots Zuffer, précédemment employés à Palmgraben [12], Schalchgraben [13], Krenngraben [14], Steyrling [15], ont été, à Salcano, disposés comme l'indique le croquis f_9 (S_1).



La surface d'appui *b'd'* était calculée pour $60^k/0^m01^2$.

On enleva d'abord les angles *abcd* - ce qui ne réduit pas encore la surface d'appui, mais diminue la hauteur à scier.

Ensuite, on donna les traits de scie *ba'*, puis *bb'* (S_1).

On attaquait en même temps, aux 7 fermes, les billots de deux files transversales symétriques par rapport à la clef, en allant des retombées vers la clef au premier trait de scie, en sens inverse au deuxième (S_5).

Le premier fit tasser la clef de 4^{mm}. Le deuxième, donné après arrêt du tassement, détacha le cintre (S_5). En moins de 5 heures, on libéra l'arc.

8. — On les avait prévus à 12^{mm}. Mais, surtout dans les plus profonds (1^m20), on ne pouvait introduire facilement le mortier à la truelle, bien que les lits eussent été dressés avec soin. On les élargit de 2 et 4^{mm}, ce qui augmenta le développement de l'arc : on compensa, en réduisant de 6^{cm} à 8^{cm} l'épaisseur des assises de clavage (S_6).

9. — de l'*Adriatischen Portlandzement-Aktiengesellschaft* de Spalato.

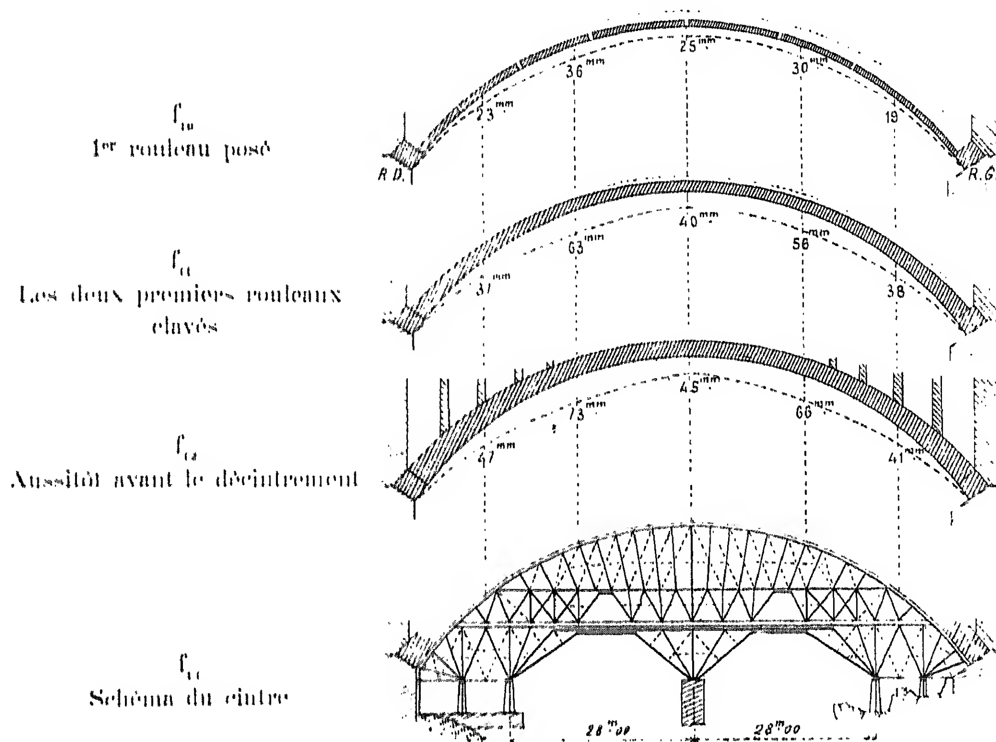
10. — A la fin du matage, l'eau refluait à la surface (S_6).

11. — A chaque coup de masse, on sentait vibrer le voussoir (S_6). On pouvait retirer à la main les coins **C** le lendemain du matage (S_1).

12. - $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$)8 ; 13.- $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$)9, Tome II. 14.- $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$)17 ; 15.- $\widehat{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$)18, Tome III.

Les billots Zuffer se comportèrent « *de manière véritablement remarquable* »[16].

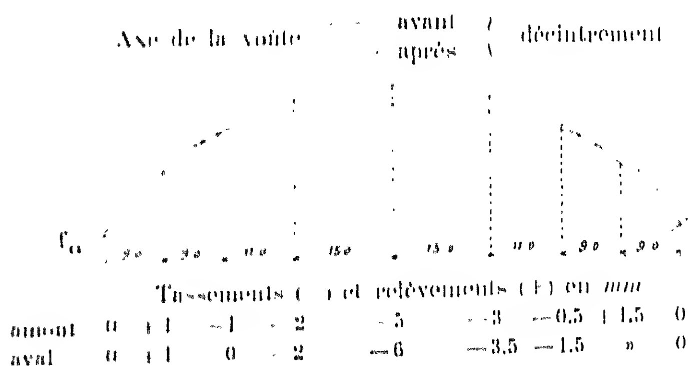
11. Tassements du cintre pendant la construction de la voûte (S_6).



Le tassement a continué après le clavage des 2 premiers rouleaux [17].
Au-dessus des passes, la voûte a plus tassé qu'au droit des appuis.

12. Mouvements de la voûte au décintrement (S_6).

— Tout au contraire, au décintrement, elle s'est aplatie au cerveau et cambrée aux reins.



amont	0	+1	−1	−2	−5	−3	−0.5	+1.5	0
aval	0	+1	0	−2	−6	−3.5	−1.5	»	0

On a donné cette explication :

D'après l'épure, la résultante des actions sur le sol agit sur la moitié arrière. Créée par le décintrement, elle a comprimé l'éboulis et le conglomérat plus à l'arrière qu'à l'avant, et fait pivoter la culée vers l'arrière.

On n'a pas constaté de fissures dans la voûte.

Chaque culée a reculé de 0mm2 environ.

On avait surhaussé la clef de 20cm : elle n'a tassé que de 5cm. On a racheté la différence (15cm) en réduisant de 102cm à 87cm la revanche du rail sur l'extrados.

16. « *in wirklich ausgezeichneter Weise* » (M. Zuffer, - S_5).

17. — contrairement à ce qui s'est passé pour la plupart des grandes voûtes construites par rouleaux (voir Tome V).

13. Mouvements de la clef dus aux variations de température (S_6).

Dates		Températures en degrés Celsius au soleil	Températures en degrés Celsius à l'ombre	Abaissements par rapport au 15 septembre 1905 de la température à l'ombre	Abaissements par rapport au 15 septembre 1905 de la clef
Septembre 1905	15 — 3h s.	+ 35°	+ 27°	»	»
	18 — 8h m.	»	+ 18°	9°	45mm
Janvier 1906	5 — 3h s.	»	+ 3°	24°	55mm5
	8 — 3h s.	+ 9°	+ 2°	25°	27mm5

14. Dates (S_1, S_3).

Fondations			juillet 1904 — mars 1905
Cintre	Pile en maçonnerie		octobre 1904 — février 1905
	Fermes		février — fin avril 1905
Grande voûte 18 jours de travail effectif (90mc par jour)	Commencement (après pose et maçonnerie des 5 premières assises)		5 juin 1905
	1er rouleau	Fin de la pose à sec	10 juin
		Fin du matage	14 juin
	2e rouleau. — Commencement		15 juin
	3e rouleau		25 juin — 1er juillet
	Décintrement		8 août
Achèvement des maçonneries			mi-novembre 1905
Ouverture à la circulation			19 juillet 1906 (S_3)

15. Quantités et Dépenses (Partie centrale, entre les clefs des voûtes voisines de la grande arche, – 9420mc) (S_6).

A. Quantités et Prix d'unité.

			Quantités	Prix d'unité
Fouilles dans la terre et le rocher			7600mc	2f 18
Maçonneries à ciment Portland	Béton à 1/4/6		1189mc	28f 98
	Moellons ordinaires		3338mc	28f 98
	— appareillés en voûte		351mc	39f 48
	Moellons équarris id.		171mc	54f 86
	Parements vus de moellons ordinaires		2800mq	3f 02
	Pierres de taille pour la grande voûte		1941mc	162f 75
Dalles en béton armé des fondations	Béton à 1/2/3		1270mc	39f 90
	Poutrelles en fer		102T	340f
Pont de service (Bois ronds 510mc ; bois équarris 116mc)			626mc	»
Cintre	Bois : Chêne 23mc ; Bois tendre rond... 120mc, équarri 1066mc	Partie supérieure	568mc	»
		— inférieure	463mc	»
		Pieux	178mc	»
	Fers (Partie supérieure 4T 7)		10T	»
	Pile en maçonnerie	Fondation à l'air comprimé	716mc	182f 70
		Élévation	336mc	23f 62
Poids de ciment Portland de Spalato			1066T 3	

B. Prix totaux.

		Rive droite	Rive gauche	
Culées	Terrassements	19530 f	2541 f	
	Dalles en béton armé	52437 f	30355 f 5	
	Pierres de taille sous les retombées	17577 f	11896 f 5	
	Autres maçonneries	45486 f	6972 f	
		135030 f	51765 f	186795 f
Pilastres, jusqu'au niveau des retombées des voûtes voisines *(a)*				46620 f
Grande voûte *(b)*				286440 f
Maçonneries au-dessus de *a* et *b*				64260 f
Chape, gargouilles, remplissage				12180 f
Plinthes, dés, parapets				46515 f
Cintre (Pile en rivière : 142590 f)				287910 f
Défense et assèchement des fouilles				15750 f
Sondages, précautions contre le feu, travaux en régie				13020 f
Fouille rive gauche abandonnée				15540 f
				975030 f

16. Personnel (S_3, S_6).

Ingénieurs :

Projet d'ensemble et Direction générale des Travaux. — Service de la Construction des Chemins de fer de l'État.

« Hofrat » J. Zuffer, Directeur du Service, à Vienne.

Direction locale. M. Léopold di Gasperra, puis M. Otto v. Bertele, Ingénieurs en chef à Goritz. M. Heinrich Bincer, Ingénieur (S_6).

Projet de détail et Surveillance des Travaux. M. Örley, Ingénieur à Salcano (S_6).

Calculs. M. Robert Schönhöfer, Ingénieur (S_6).

Entrepreneurs : (Grande voûte et ses deux pilastres) : les frères Redlich et Berger.

SOURCES :

S_1. Zeitschrift des œsterreichischen Ingenieur- und Architekten Vereines, 29 octobre 1909, p. 701 à 705, Pl. IX : « *Die gewölbte Brücke über den Isonzofluss bei Salcano* », Ingenieur Rudolph Jaussner, Inspektor im K. K. Eisenbahn-Ministerium.

Les dessins t_1 à t_3 sont extraits de S_1.

S_2. Geschichte der Eisenbahnen der œsterreichisch-ungarischen Monarchie, VI Band, 1898-1908, II Band. « *Der Brückenbau der neuen Alpenbahnen. — A. Steinbrücken* ». Josef Zuffer, p. 74 à 87.

S_3. Renseignements (S'_3) et photographie (S''_3) gracieusement donnés par le Ministère des Chemins de fer à Vienne.

S_4. Ce que j'ai vu : (S'_4) octobre 1908, (S''_4) août 1909.

S_5. Zeitschrift des œsterreichischen Ingenieur- und Architekten Vereines, 1908, p. 174 à 176 : « *Die Ausrüstung der grossen Wölbbrücken im Zuge der neuen Alpenbahnen* ». J. Zuffer, K. K. Ober-Baurat.

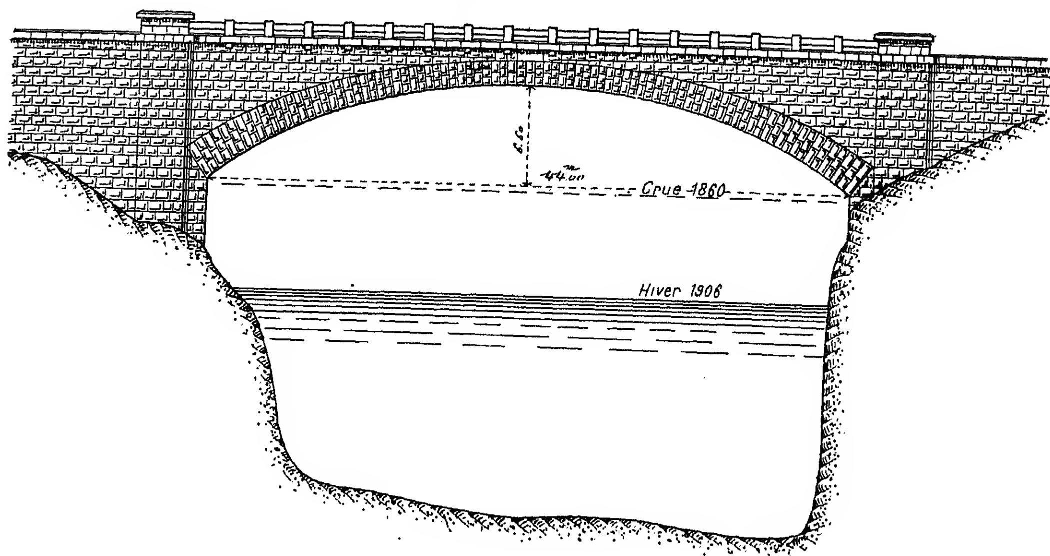
S_6. Id., 1910, — 19 août, p. 529 à 532 ; 26 août, p. 541 à 546, « *Erfahrungen und Beobachtungen beim Bau der 85m weiten Wölbbrücke über den Isonzo bei Salcano* » von Ing. Dr. Leopold Örley, Baukommissär der K. K. österreichischen Staatsbahnen.

PONT sur le Hallingdalselven, à SVENKERUD (Norvège)

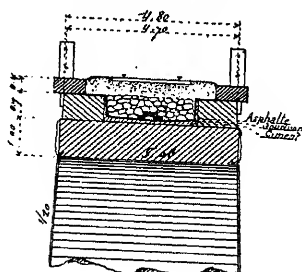
Chemin de fer de Christiania à Bergen

1905-1907 $\hat{\mathbf{A}}^{1}$ F^{r} ($> 40^{m}$)20

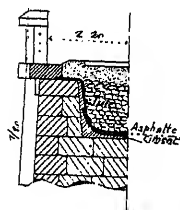
f_1 — Élévation — 2^{mm}



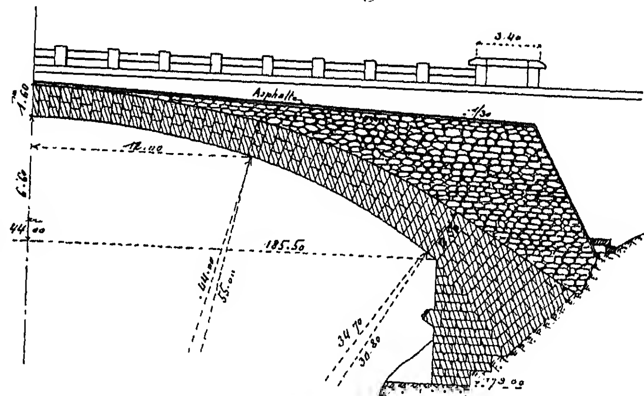
f_3 — Coupe en travers à la clef 5^{mm}



f_4 — Chape— 5^{mm}



f_2 — Coupe en long — $2^{mm}5$



1. Dates (S''_1).

Commencement des travaux	septembre 1905
Construction de la voûte	10 juillet - 26 octobre 1906
Décintrement	2 mai 1907
Ouverture à la circulation	13 mai 1907

2. Personnel (S''_1).

Projet : Service de la Construction des Chemins de fer de l'Etat norvégien.

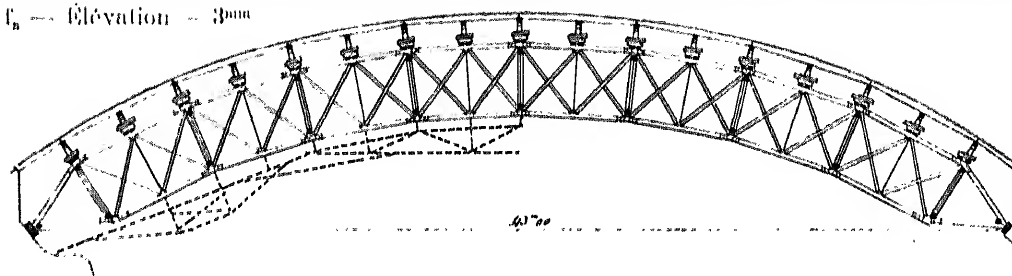
Direction des Travaux : L'Ingénieur en chef du Chemin de fer de Bergen (partie Est).

Φ_1 (S'''$_1$)

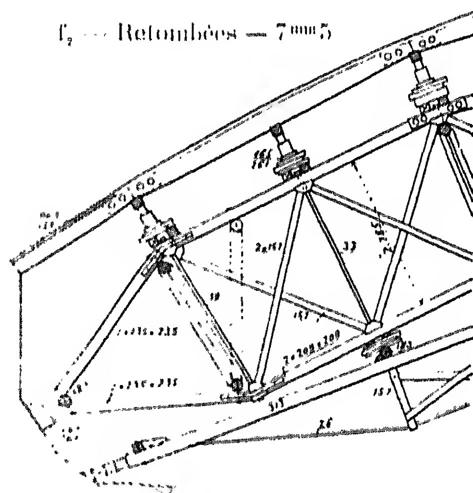


Cintre

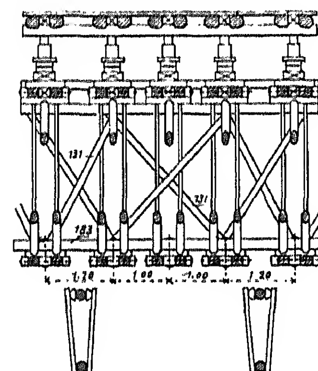
f_1 — Élévation — 3mm



f_2 — Retombées — 7mm5



f_3 — Coupe en travers à la clef 7mm5



SOURCES : Celles du Pont sur le Strandeelven $\widehat{A}^1$ Fr (... 40m)16 – Tome III.

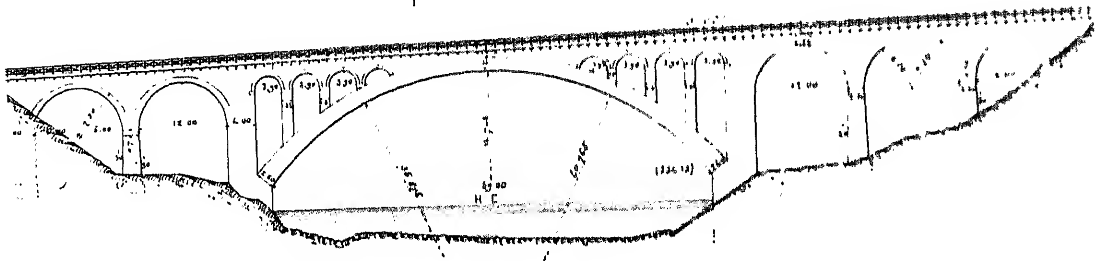
PONT SUR LA MURG, PRÈS DE LANGENBRAND

(ALLEMAGNE, – Grand-Duché de Bade)

Chemin de fer de Weisenbach à Schönmünzach

1907–1909 Â[1] Fer (40m,21

f_1 — Ensemble

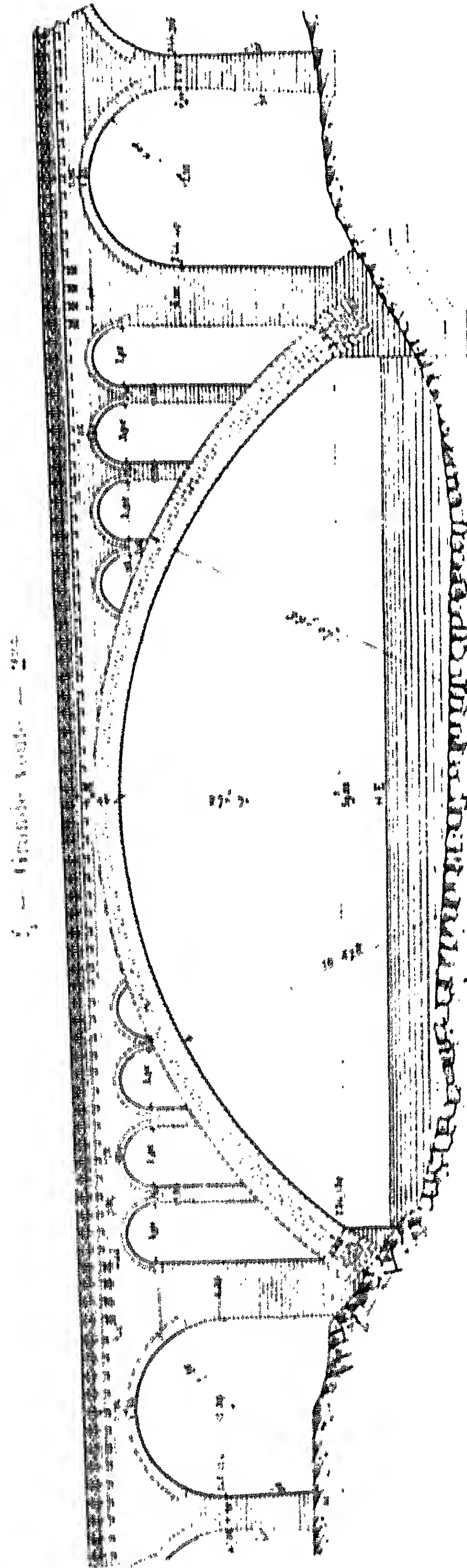


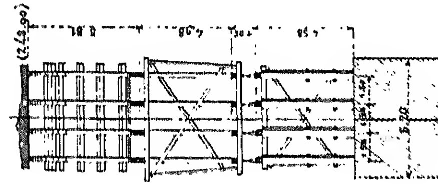
1. Dates (S''_1), (S_1).

Fondations	1er septembre 1907 – 1er mai 1908
Grande voûte	30 septembre – 14 décembre 1908
Décintrement	8 février 1909
Achèvement des travaux	fin août 1909 (S_4)

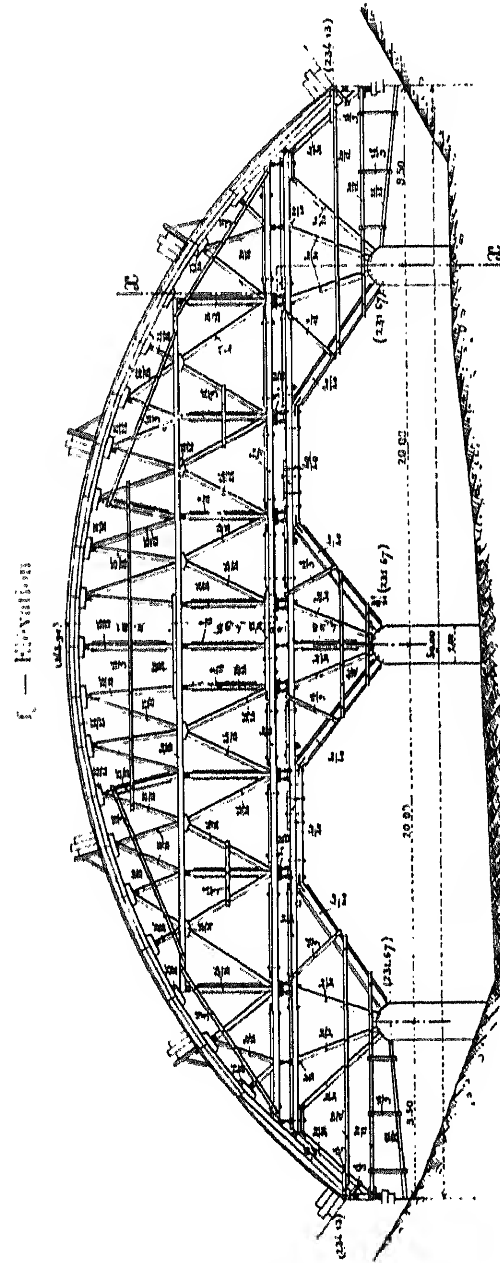
Φ_1 (S_2)



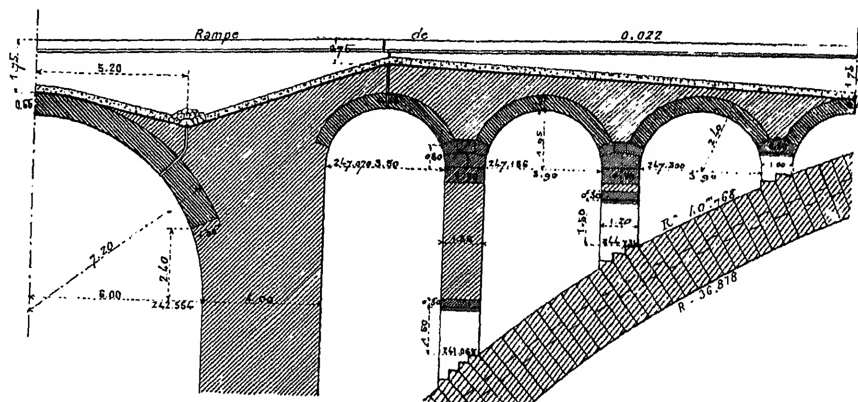




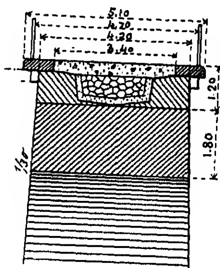
Cintre



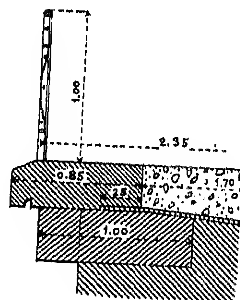
f_3 — Coupe en long — 4mm



f_1 — Coupe en travers à la clef — 5mm



f_4 — Plinthe — 2cm



2. Personnel (S''$_1$).

Projet et Direction des Travaux : Inspection de la Construction des Chemins de fer, à Gernsbach.

Entrepreneur : M. Wilhelm Bruch, de Berlin.

SOURCES :

S$_1$. — Dessins d'exécution (S'$_1$) et renseignements (S''$_1$), gracieusement communiqués par la Direction des Chemins de fer du Grand Duché de Bade.

S$_2$. — Deutsche Bauzeitung, 1910 : 17 septembre, p. 593 à 595 ; 24 septembre, p. 609 et 610 ; 1er octobre, p. 629 à 634 : « *Eine neue Schwarzwaldbahn Weisenbach-Forbach* », von Regierungs-Baumeister Gaber, in Heidelberg.

PONT SUR LA CHARENTE[1], PRÈS DE LUSSERAT *(CHARENTE-INFÉRIEURE)*

Ligne de Saint-Jean-d'Angély à Saujon

1908-1910 $\hat{\mathbf{A}}^1$ $F^r (\geqslant 40^m)22$

Φ_1 (S'''_1)



1. Pourquoi on a fait une grande voûte. — Pour ne pas gêner la navigation.

2. Appareil. — *A. Bandeau.* — Le dessous de l'archivolte et les arcs passant par les queues des voussoirs divisent chaque joint en 5 parties égales.

B. Culées (S_3). — Au-dessus de murs à joints incertains et gros bossages, un couronnement en pierre de taille lisse ne semble pas à sa place.

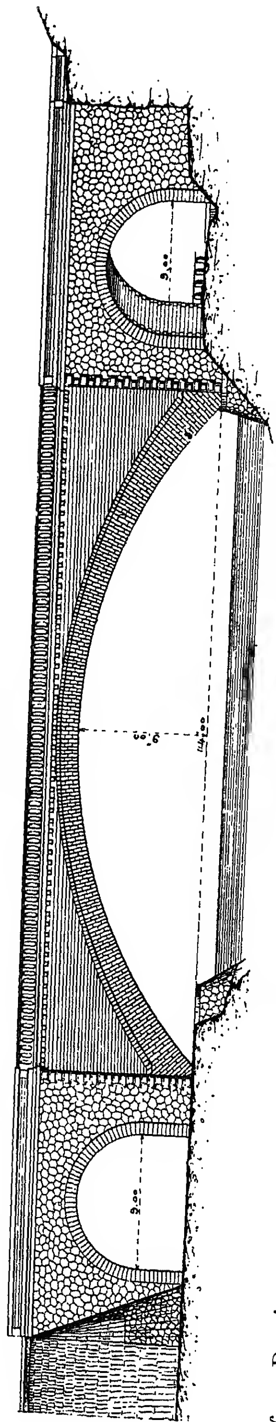
Les bandeaux des voûtes latérales paraissent maigres.

3. Fondation, à l'air comprimé, de la culée rive droite (f_2). On put, dans le caisson, déblayer l'argile à sec, jusqu'à 7^m60 sous l'étiage.

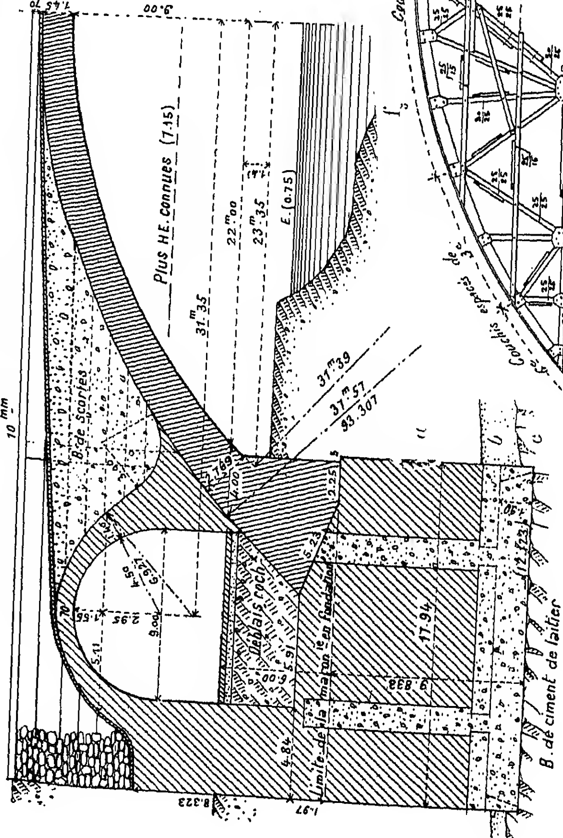
Après l'avoir rempli, on y comprima un coulis de ciment[2], à $2^k/\overline{0^m01}^2$: il en entra très peu.

1. — à 3^k en amont de Saintes.

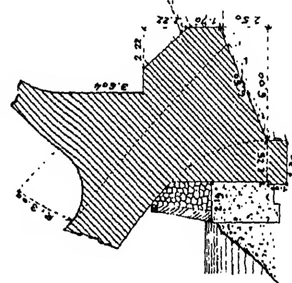
2. — Comme au Pont de Marmande. (Annales des Ponts et Chaussées, février 1883, « *Fondations à « l'air comprimé d'un pont sur la Garonne, à Marmande* ». M. Séjourné).



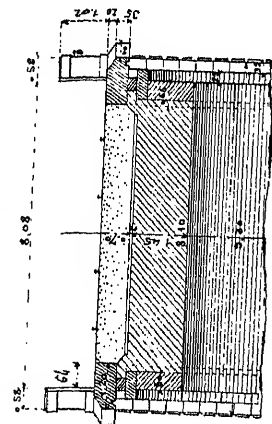
f₁ — Élévation — 2mm



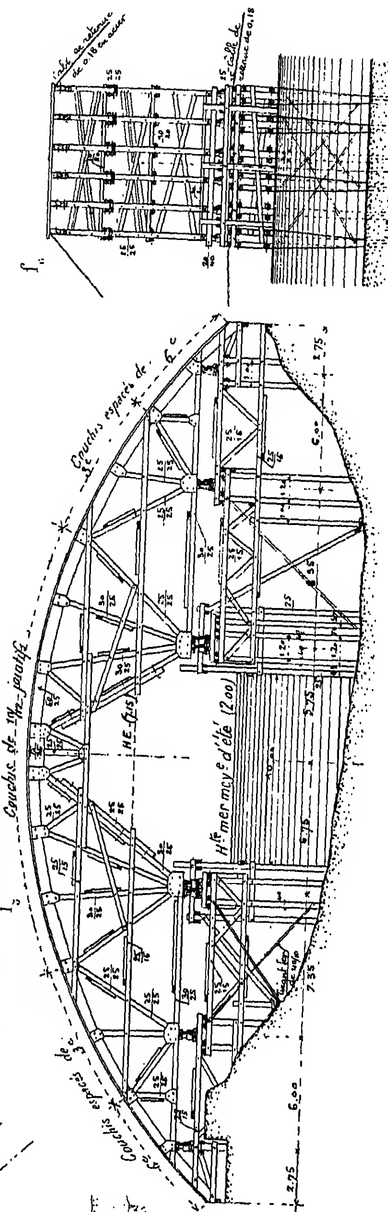
f₂ — Demi-coupe en long, côté rive droite — 2mm5



f₃ — Culée rive gauche — 2mm5



f₄ — Coupe en travers à la clef — 5mm

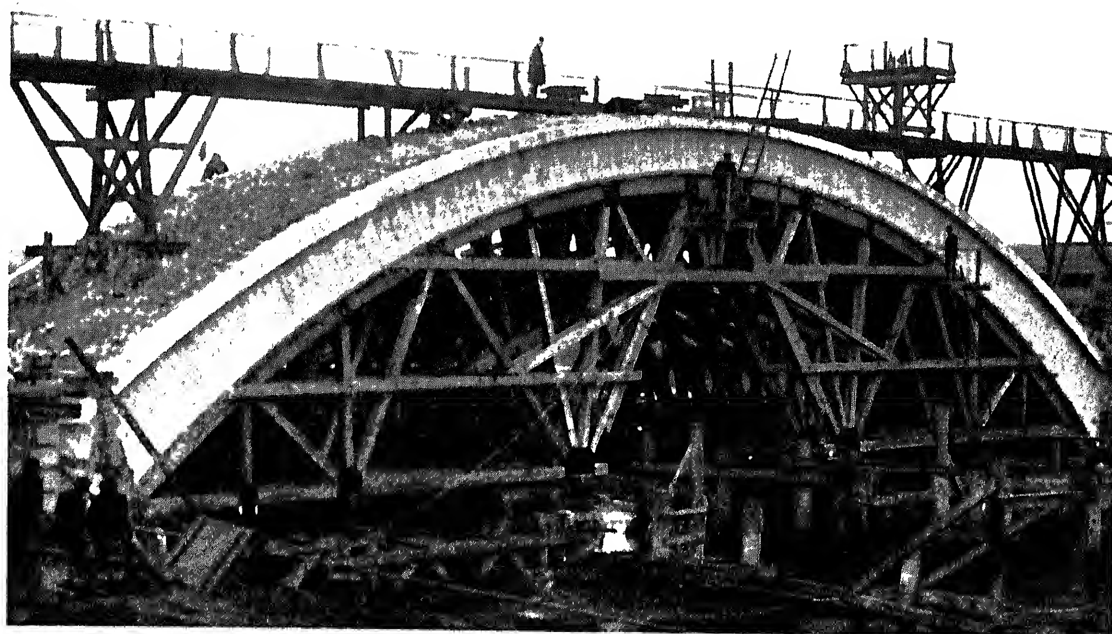


f₅ — Cintre — 2mm5

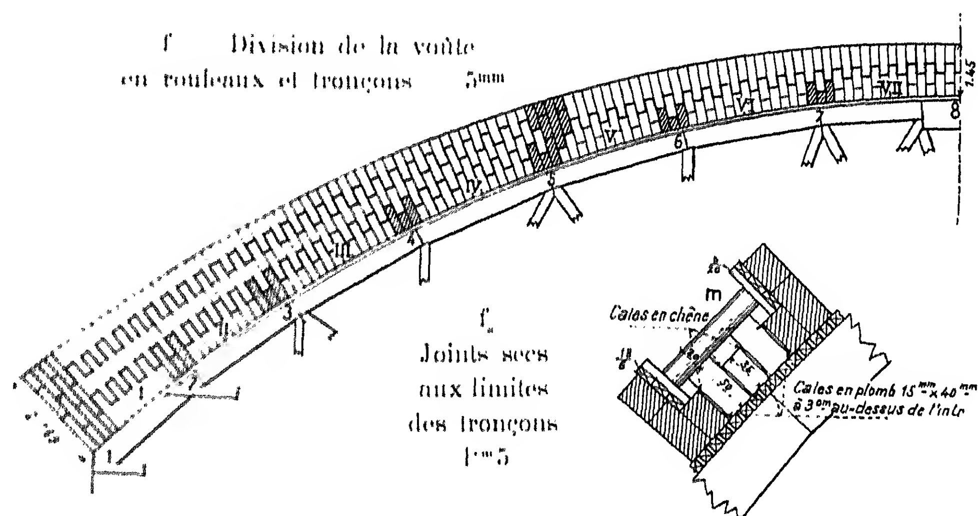
f₆

a) Argile d'alluvions.
b) Gravier.
c) Rocher calcaire.

Φ_2 (S_3)

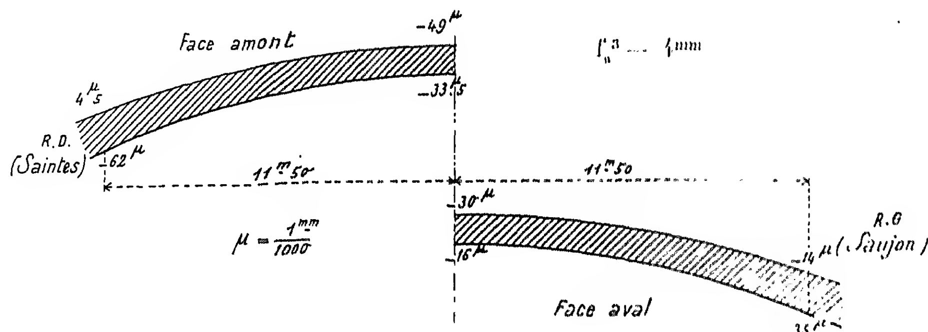


1. Exécution de la grande voûte (f_7, f_8). — *A. - Division en rouleaux.*
Elle a été construite en 3 rouleaux, le 2e limité aux reins.



B. - 1er Rouleau. — On l'a exécuté en 13 tronçons, séparés, au-dessus des points fixes du cintre, par 14 intervalles formés de 3 voussoirs posés à sec (f_8). Les moellons de queutage du 1er rouleau s'appuyaient sur des madriers *m* (f_8).

5. Mouvements au décintrement (mesurés avec 8 appareils Manet-Rabut à tiges de 1m) (S''1).



6. Mouvements dus à la température (S''1). — Pour un abaissement de température moyenne de 17° (de + 13° à − 4°), on a observé un abaissement à la clef de 6mm [4].

7. Dates (S''1).

Fondations	avril-décembre 1908
Grande voûte	août-octobre 1909
Décintrement	26 octobre 1909

8. Personnel (S''1).

Ingénieurs en chef	jusqu'en 1908	M. Meunier.
	après	M. Perrier.
Ingénieur ordinaire		M. Alexandre.

Entrepreneurs : MM Marlaud.

3. — De ces chiffres, M. Alexandre conclut qu'au décintrement, la courbe de pression passait, à la clef, à 6cm au-dessus de la fibre moyenne, — aux reins, près du 1/3 inférieur (S1).

4. — M. Alexandre donne ce calcul :
Le développement moyen de la voûte est de 54m, dont pour les joints de mortier : 0,4 × 54m = 21m60.
Si on admet pour le coefficient de dilatation du mortier de ciment, 11×10^{-6}, et si on considère la pierre calcaire comme non dilatable, on trouve, pour un abaissement de 17°, un raccourcissement de :

$$17° \times 11 \times 10^{-6} \times 21^{m}60 = 4^{mm}$$

En supposant encore que la courbe déformée reste un arc de cercle, l'abaissement correspondant à la clef est 4mm5 au lieu des 6 mesurés.

SOURCES :

S1. — Dessins d'exécution (S'1), renseignements (S''1) et photographie (S'''1) gracieusement communiqués par M. Alexandre.

S2. — Ligne de Saint-Jean-d'Angély à Saujon. — Rapport sur l'exécution des travaux et les dépenses effectuées. — MM. Perrier et Alexandre, — p. 55 à 63, Pl. 8 et 9 : « *Pont sur la Charente* ».

S3. — Ce que j'ai vu — octobre 1909.

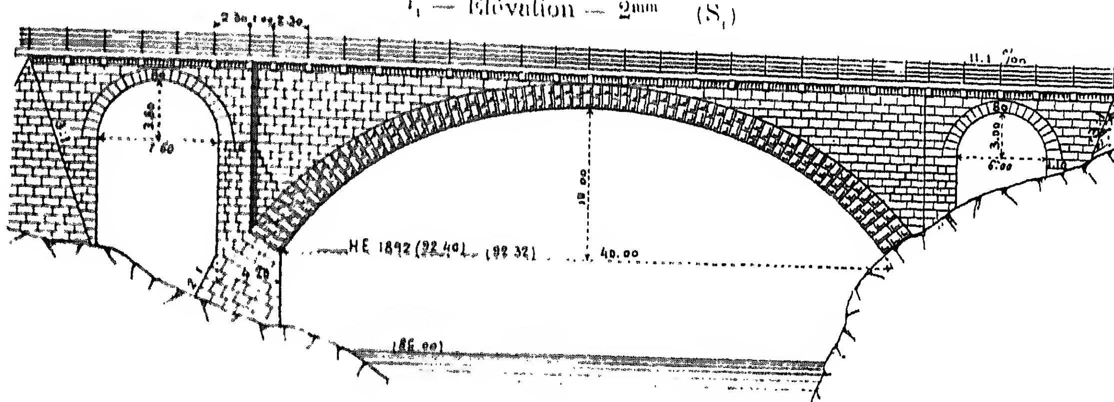
Ce qui n'est pas spécifié S1 ou S2 est de S3.

PONT SUR LE NIDELVEN, A **BOÏLEFOS** *(NORVÈGE)*

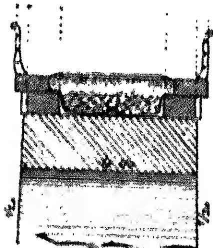
Ligne d'Arendal à Aamli

1908-19.. $\widehat{\mathbf{A}}^1$ F^r (> 40m) 23

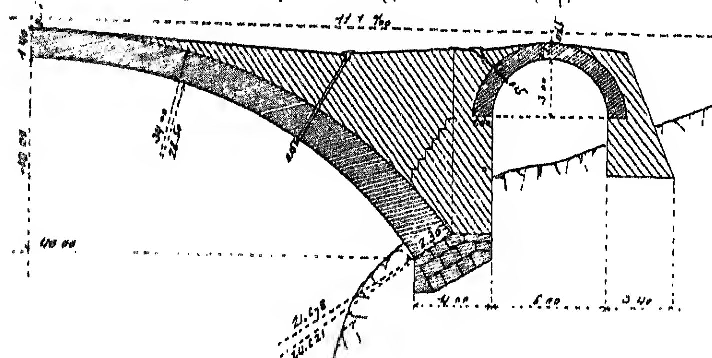
f₁ — Élévation — 2mm (S₁)



f₂ Coupe en travers à la clef 5mm (S₁)

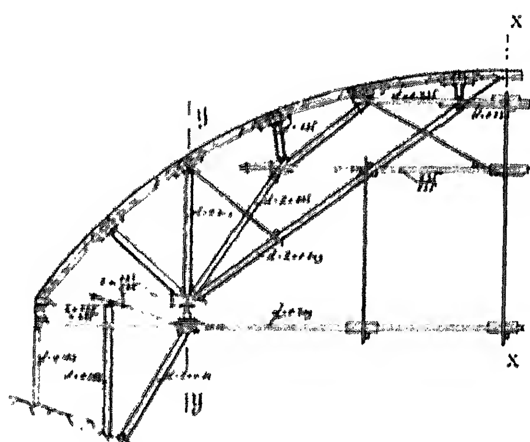


f₃ — Coupe en long — 2mm5 (S₁)



Cintre — 3mm (S₄)

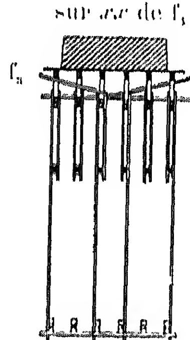
f₄ Demi-élévation



Coupes en travers

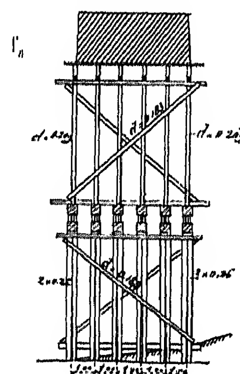
sur *xx* de f₄

f₅



sur *yy* de f₄

f₆



I. Personnel (S₇).

Projet : Service de la Construction des Chemins de fer de l'État norvégien.

Direction des Travaux : L'Ingénieur de la ligne Arendal-Aamli.

Φ_1 (S_3)



SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution gracieusement communiqués par M. O. Carlsen, Directeur de l'École Polytechnique de Bergen, — avril 1911.

S_2. — Dessins du cintre et renseignements, gracieusement adressés par M. Fleischer, (Direction des Chemins de fer de l'État norvégien à Christiania), — mai 1912.

S_3. — Photographie qu'a bien voulu me donner M. Jenssen (Direction des Chemins de fer de l'État norvégien à Christiania), — novembre 1912.

PONT SUR LA THUR, A LICHTENSTEIG *(SUISSE, - Saint-Gall)*

Ligne Romanshorn-St. Gall-Uznach (Bodensee-Toggenburg-Zurichsee)

1907-1909 $\widehat{A}^1$ Fr ($\geq$ 40m)24

Φ_1 (S_8)



1. Efforts dans la voûte en kg 0m01², *(Méthode Ritter).*

sous une surcharge de 1800k m²:	Clef	Joints de rupture	Retombées
a. sans tenir compte des variations de température (S''_1)	27k5	28k9	23k2
b. pour une variation de température de 15° (S_2).	31k5	— 1k5 (tension)	
E = 1 × 10⁹ en kg 0m01² ; α = 8,8 × 10⁻⁶ (S''_1)			
c. pour un recul des culées de 1cm (S_2) :			
c_1. avec resistance à la tension	38k		— 9k9 (tension)
c_2. sans resistance à la tension	40k		42k

2. Cintre. — *A. - Efforts* (S'_1). — Les montants et contrefiches travaillent à 23k5 ; les vaux à 80k (limite admise) ; les billots de décintrement, à 20k normalement aux fibres, à 60k dans le sens des fibres.

Les pieux portaient au plus 12k5.

f1 — Élévation — 2mm (S2)

f2 — Coupe en travers sur xx de f1 — 5mm (S2)

f3 — Exécution de la voûte 1er et 2e rouleaux — 3mm (S'1)

Billots de décintrement — 2mm (S'1)

f6 — Vue de face

f7 — Vue de côté

Cintre — 2mm5 (S'1)

f4

f5

B. – Surhaussement de 80^{mm} (S'_1). — On l'a calculé par la formule :

$$4^{mm} + 2^{mm}5 \left[2\,a \text{ (portée en mètres)} - b \text{ (montée en mètres)} \right].$$

3. Dates (S''_1).

Commencement des travaux	automne 1907
Grande voûte	octobre 1908 — mai 1909
Décintrement	juin 1909
Ouverture à la circulation	octobre 1910

4. Personnel (S''_1).

Projet : Service de la Construction du Bodensee-Toggenburgbahn.

Direction des Travaux : M. R. Weber, Ingénieur en Chef.
M. Hünerwadel, Ingénieur.

Exécution en régie.

SOURCES :

S_1. Dessins (S'_1) et renseignements (S''_1) gracieusement communiqués, en septembre et novembre 1912, par M. Acatos, Ingénieur en chef du Bodensee-Toggenburgbahn, à Saint-Gall.

S_2. Bodensee-Toggenburg-Zürichsee, – Denkschrift über die Eisenbahn-Verbindung Romanshorn-St-Gallen-Wattwill-Uznach, – p. 95, Pl. 11 : « *Der Thurviadukt bei Lichtensteig* ». Zollikofer et Cie, Saint-Gall, 1911.

S_3. Ce que j'ai vu — juillet 1912.

PONT SUR LA THUR, A KRUMMENAU *(SUISSE, – Saint-Gall)*

Ligne d'Ebnat à Nesslau

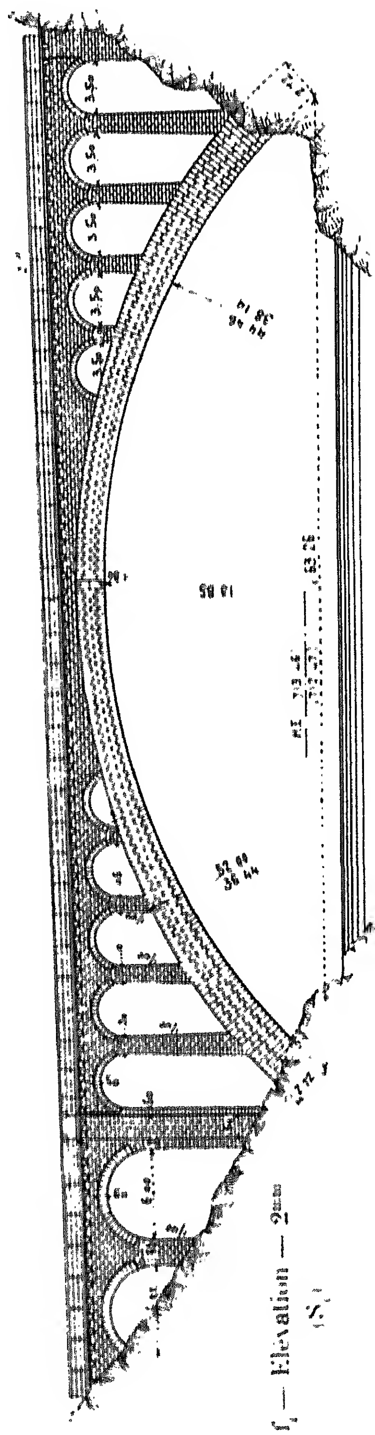
1910-1911 $\widehat{A}^1$ Fr (>40m)25

Φ₁ (S₃)

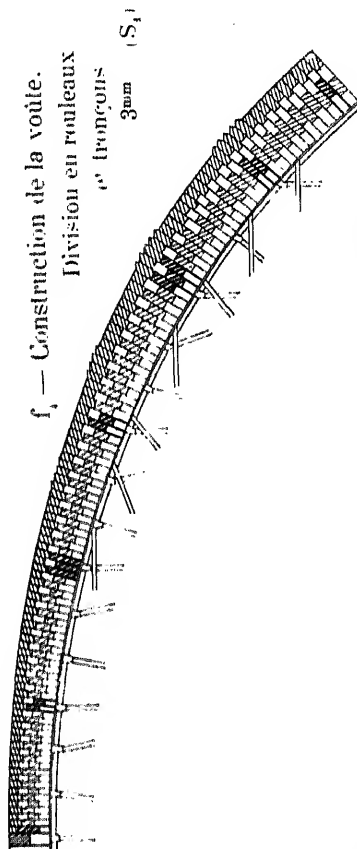


1. Efforts dans la voûte, en kg/$\overline{0^m01}^2$ (S_4), calculés sans tenir compte de la résistance à la tension.

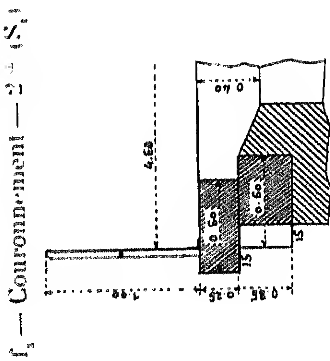
Distance horizontale du milieu du joint à la clef			*Côté Ebnat (RD)* Retombée 32m5	28m	18m	9m	*Clef* 0	*Côté Nesslau (le plus haut) (RG)* 9m	18m	28m	Retombée 32m5
Sous le poids propre	Extrados		15k	8k	14k	20k	18k	»	»	»	»
	Intrados		**20**	**31**	**26**	**22**	**25**	»	»	»	»
Sous la surcharge :											
1° sans tenir compte des variations de température	Extrados	Effort MAX..	**30**	**14**	**20**	**29**	**26**	**34**	**23**	**10**	**22**
		— min..	7	5	8	12	15	17	9	3	0
	Intrados	— MAX..	**31**	**33**	**33**	**32**	**31**	**27**	**31**	**35**	**39**
		— min..	8	23	17	15	20	9	15	27	17
2° pour une variation de température de ± 15°	Extrados	Effort MAX..	**36**	»	»	»	**30**	**36**	»	»	»
		— min..	»	»	7	»	11	»	»	»	»
	Intrados	— MAX..	»	»	**34**	»	**36**	»	»	**37**	**46**
		— min..	2	»	»	»	15	7	»	»	»



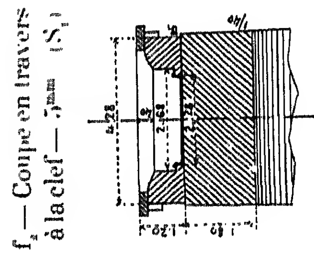
f₁ — Elévation — 2mm (S₁)



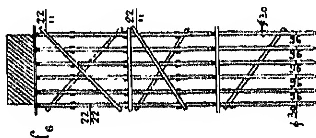
f₄ — Construction de la voûte. Division en rouleaux et tronçons 3mm (S₁)



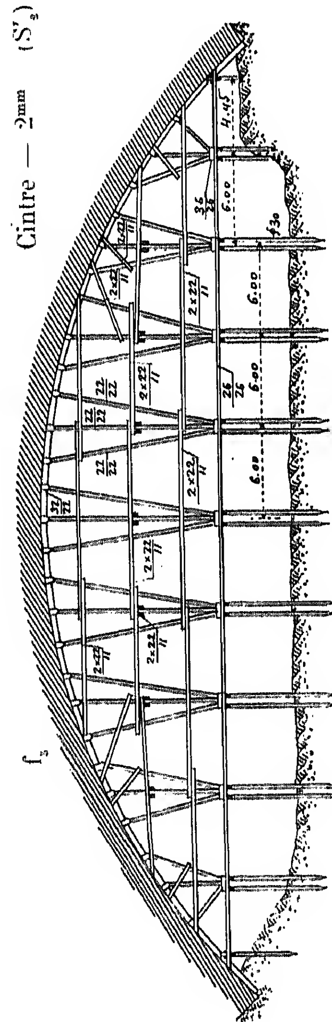
f₃ — Couronnement — 2mm (S₁)



f₂ — Coupe en travers à la clef — 5mm (S₁)



f₆



f₅ Cintre — 2mm (S'₂)

2. Cintre (S'_2). — *A. - Efforts.* — Les montants et contrefiches travaillaient au plus à $18^k6/\overline{0^m01}^2$, les vaux à 60^k, le platelage à 87^k.

Les pieux, de 28^{cm}, battus au refus de 7^{mm}, avec un mouton de 480^k tombant de 4^m, portaient 13 tonnes.

B. - Surhaussement de 130^{mm}. — On l'a calculé par la formule :

$4^{mm} + 2^{mm}5 \left[2\,a \text{ (portée en mètres)} - b \text{ (montée en mètres)}\right]$.

C. - Prix de revient.

1° Palées [1].			
Fournitures		3.144^f60	
Pieux : $49^{mc}3$ à 33^f = 1626^f90.			
Main-d'œuvre		3.054^f25	
Outils et frais généraux (9 %)		557^f90	
Brise-lame pour protéger les palées		2.125^f	8.881^f75
2° Cintre proprement dit.			
Fournitures :			
Bois équarri : 194^{mc} à 55^f	10.670^f		
Planches : 23^{mc} à 50^f	1.150^f		
Fers	2.969^f		
Divers	350^f	15.139	
Main-d'œuvre :			
Façon des bois [2]	1.260^f		
Transport et montage [2]	2.322^f60		
Abaissement du cintre, démontage, transport au dépôt	1.102^f50	4.085^f10	
		19.824^f10	
Outils et frais généraux 9 %		1.785^f15	21.601^f25
Prix total du cintre			30.490^f
A déduire, valeur du matériel conservé			4.990^f
Prix net du cintre (sans bénéfice de l'Entrepreneur)			25.500^f
soit par mc. de maçonnerie de voûte [3]		32^f70	
par mq. de surface d'élévation sous la douelle		37^f	

D. - Salaires. — Prix de l'heure (S''_2).

Maître-charpentier	1^f
Charpentier	0^f63
Maçon	0^f63
Mineur	0^f50
Manœuvre	0^f43

1. — Longueurs moyennes : d'un pieu, 5^m73 ; de fiche, 1^m51. — Le mètre courant de pieu a coûté, y compris les sabots, 9^f45.

2. — La main-d'œuvre a coûté, par m. c. de bois équarri : façon des bois, 6^f50 ; transport et montage, 12^f.

3. — Par m. c. de maçonnerie de voûte (780^{mc}), on a employé $0^{mc}365$ de bois ; - par m. c. de bois (285^{mc}), 28^k de fer, 40, 8 heures de travail.

3. Exécution de la voûte.

— Comme au pont de Montanges[1], les voussoirs se découpent, non seulement d'une assise à l'autre, mais dans la même assise (S'''_1).

Le mortier n'a pas été maté, mais seulement fiché (S_4).

4. Dates.

Commencement des travaux	juillet 1910
Grande voûte	mai — 10 août 1911
Décintrement	8 septembre 1911
Ouverture à l'exploitation	1er octobre 1912

5. Tassement des fermes de rive, en *mm* (S_1).

		Côté Ebnat (RD)				Côté Nesslau (RG)					
Distance horizontale à la clef		22m 40		11m 60		Clef		12m 20		22m 20	
Dates (1911)		amt	avt	amt	avt	amt	avt	amt	avt	amt	avt
1er rouleau	27 mai	-4	0.5	4	3	0.5	0.5	6	7	3	0.5
	6 juin	7	10.5	5	4	6	6.5	3.5	3	2	10
	16 juin	12.5	14	11	10.5	8.5	9	8	7.5	7.5	14.5
2e et 3e rouleaux	23 juin	13	13.5	11.5	11.5	5	6	7	7	8	15
	11 juillet	20	34.5	24.5	26	18	18	24	25	26	37.5
4e rouleau	19 juillet	33.5	35	27	27	20.5	20.5	28	28.5	28	37.5
	1er août	30.5	33.5	27.5	27	24	24	28	28.5	28	36.5
	14 août	32.5	35.5	33	28.5	26.5	24	33	32	29.5	39.5

6. Tassement des bandeaux, en *mm* (S_4).

	Côté Ebnat (RD)				Côté Nesslau (RG)					
Distance horizontale à la clef	22m 40		12m 80		Clef		11m 80		22m 20	
Dates des observations (1911)	amt	avt	amt	avt	amt	avt	amt	avt	amt	avt
1er août (par rapport au 19 juillet)	0	1.5	2	1	4.5	4.5	2	2	0	0
14 août	2	2	5.5	1.5	2.5	0	5	3.5	1.5	3
8 septembre (décintrement) (toutes les piles et les 6 voûtes extrêmes d'évidement construites)	0	1	2	2	4.5	2	2	2	1	1
19 septembre (les voûtes d'évidement achevées)	9.5	6	9.5	17	11	11	12	14	8	8.5
1er décembre (le pont achevé)	6	2	6	2	11	13	13.5	13.5	10	1.5

1. — Â[1] pte (- 40m)11, Tome III.

7. Personnel.

Ingénieurs.

Projet : Service de la Construction du Bodensee-Toggenburgbahn.

Direction des Travaux : M. R. Weber, Ingénieur en chef.

Entrepreneurs : MM. Aebli, Stambach et Cie.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution gracieusement communiqués par M. Acatos, Ingénieur en chef du Bodensee-Toggenburgbahn, à Saint-Gall.

S_2. — Documents qu'ont bien voulu me communiquer, à Krummenau, MM. Aebli et Stambach :

S'_2. — Dessins et photographie du cintre. S''_2. — Etat des dépenses du cintre.
S'''_2. — Photographie de la voûte en construction.

S_3. — Ce que j'ai vu – juillet 1912.

S_4. — Schweizerische Bauzeitung, 1913 : 1er fevrier, p. 53 à 57 ; 8 fevrier, p. 69 à 73, « *Die Bahnlinie Ebnat-Nesslau* », von Ingenieur A. Acatos, Oberingenieur-Stellvertreter der B.T.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ [1]

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

SOUS ROUTE

Série $\widehat{\mathbf{A}}^{n}\, r^{te}\ (\geqslant 40^{m})$

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4.
1 pour la définition des arcs « assez surbaissés »,
2 pour le sens de ce symbole.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage* 1	ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage 2	ENSEMBLE Largeurs (entre parapets / *entre tympans sous la plinthe*) Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados 3	PROJET — GRANDES VOÛTES INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon* 4	ÉPAISSEURS CORPS Clef *Retombées* 5	ÉPAISSEURS TÊTES Clef *Retombées* 6	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1m³ de sable, de chaux ou de ciment* 7	PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
du **Vieux Château** à **Vérone** *Italie* 1354–1356 $\widehat{A}^n$ r[te] (⩾ 40m)[1] *3 voûtes en arc : 1 de 48m70 à 1/4,024 (RD) ; 1 de 28m54 à 1/5,384 ; 1 de 24m à 1/4,403 (RG).*	*119m 44 entre culées* 22mm 22mm 15m	Clef 5m95 / Imposte 6m50 *6m 80* / *7m 35*	Arc de cercle 48m70 *12m 10* $\frac{1}{4,024}$ = 0,248 *30m 55*		1m50 *1m 80 (RD)* *2m 00 en quelques points, RD.*	Bandeaux : PT[1] irrégulière Calcaire Douelle : Br[1] Quelques chaînes de PT[1]		
de **Seythenex** *France* 1908–1911 $\widehat{A}^n$ r[te] (⩾ 40m)[2] *2 voûtes en arc de cercle de 41m19 et 39m665 ; sur chaque rive, une voûte en plein cintre de 11m.*	*125m 43* 0 56m	3m80 *2m 80* Pas de fruit 0m30	Arc de cercle *Voûte rive droite* 41m19 *10m 05* $\frac{1}{4,098}$ 0,243 *26m 13* *Voûte rive gauche* 39m665 *10m 05*[2] $\frac{1}{3,946}$ 0,253 *26m 13*	0m90 *1m 10*	0m90 *1m 10*	PT[1] 2 rangées de voussoirs Pierre de Seythenex (1400k à 1800k) *Ciment Vicat no 1 600k*	Pression maxima sous la surcharge : Clef : 23k Retombées : 23k *Méry* Surcharge 400k [illegible]	1° Chaussée sur plate-forme en béton armé, portée par des colonnes en béton armé contreventées en long et en travers à 4m50 sous la chaussée. Dosage du béton armé : Ciment : 300k Sable 400l Gravier 800l 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, no 6.

2. La retombée rive gauche est à 1m78 au-dessus de la retombée rive droite

SÉRIE $\hat{A}^n$ r^le (> 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	par mq de douelle[2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] { de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Culée rive gauche : *Terre compacte et pierrailles* Pression maxima : 2k *Massif de béton, armé (2 lits, croisés, de fers ronds)* Pile, Culée rive droite : *Rocher* " "	*Voûte rive droite* Retroussé sur 10m Grands arbalétriers *Voûte rive gauche* Fixe Montants et contrefiches *Sapin* Boîtes à sable	3 { *cintre retroussé* 27 { *cintre fixe* 20 1m25 50mm	Pour les 2 cintres : 170mc 3000k 17248f [6]	 0mc63 11k1 63f5	2 rouleaux, chacun en 7 tronçons. Joints secs au-dessus des points fixes du cintre.	Voûtes nues *15 jours* 30 novembre	A chaque voûte : t_c 29mm t'_v 0	Q 2020mc Q : S_p = 4mc23 Q : W 0mc20 Q : W' 0mc29 [5] D = 136343f D : S_p = 286f1 D : W 13f6 D : W' = 19f8 D : Q = 67f5 [5]

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.
6. Forfait comprenant aussi les cintres des voûtes d'accès.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

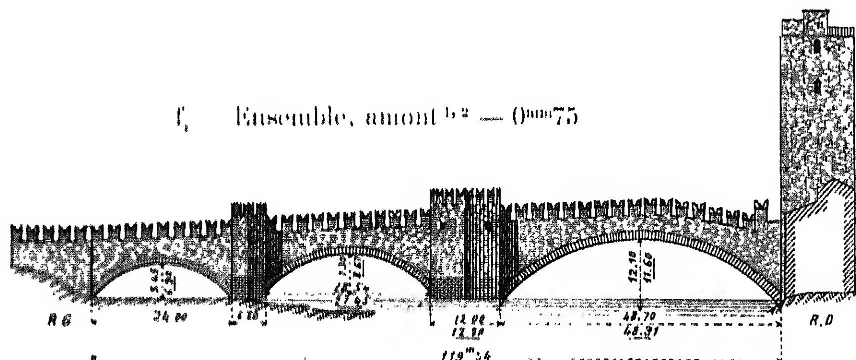
SÉRIE $\widehat{A}^n r^{te}$ (> 40m)

MONOGRAPHIES

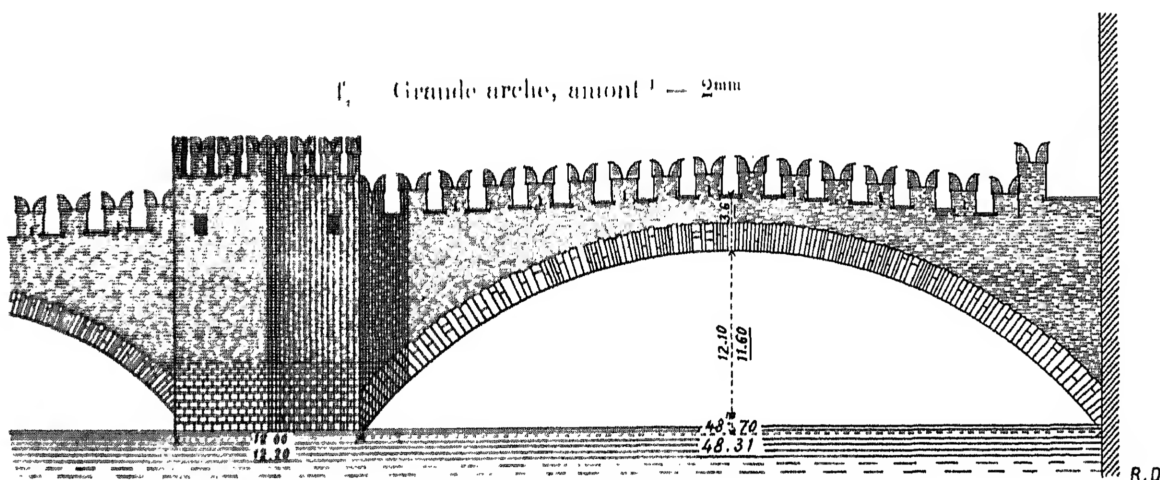
PONT DU VIEUX-CHÂTEAU *(CASTELVECCHIO)* SUR L'ADIGE A VÉRONE *(ITALIE)*

1354-1356 $\widehat{A}^n r^{te}$ (> 40m)[1]

f_1 Ensemble, amont [1,2] — 0mm75



f_2 Grande arche, amont [1] — 2mm

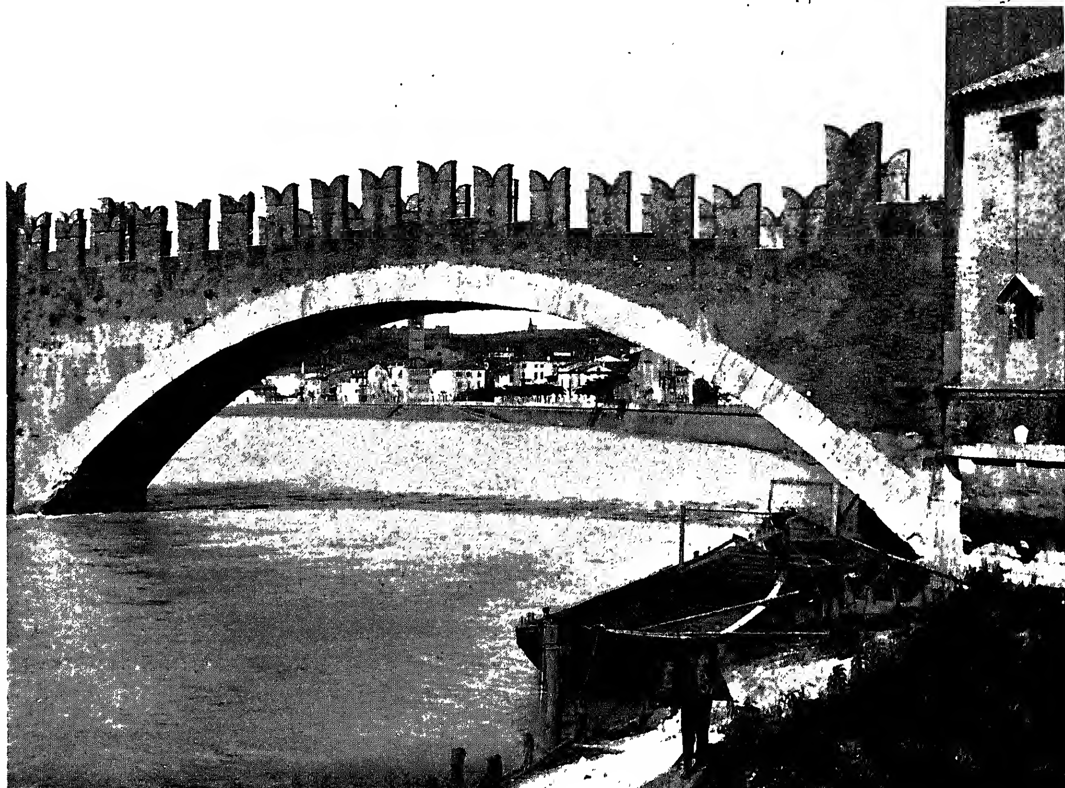


1. Ces deux figures, réduites de S_1, Pl. XVIII, ont été rectifiées d'après mes photographies. Les dimensions en ont été relevées par M. Biadego (S_1). On a souligné celles mesurées par M. l'Inspecteur Général de Dartein, qui a bien voulu me communiquer ses minutes.

2. — Gauthey donne un dessin fort inexact du pont avec une grande arche en anse de panier de 48m73, 2 arches en plein cintre de 15m27 et 11m. (*Construction des Ponts*, tome I, p. 26, Pl. I, fig. 20, — Paris, 1809. Il a été reproduit par Croizette-Desnoyers. (*Construction des Ponts*, Pl. IV, fig. 5).

T. III. — 24

ϕ_1 — amont (S_2)



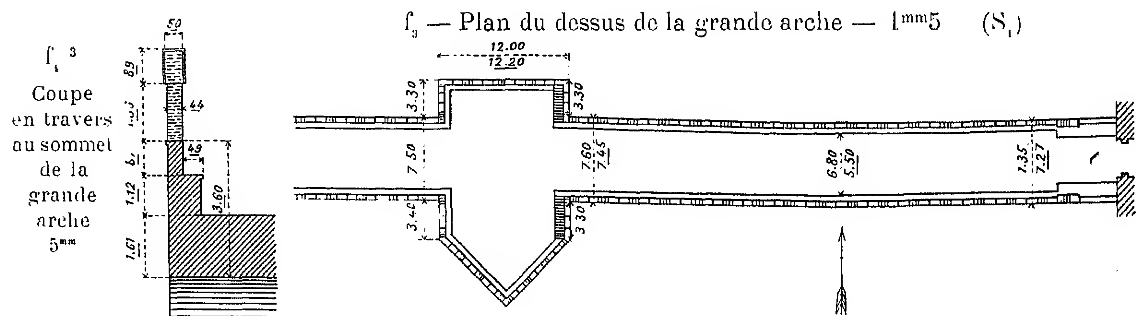
1. Grande arche. Courbe en plan. — La grande arche est en chevron courbe contre le courant.

La flèche est (S_1) :

à la tête amont	0m23
à la tête aval	0m78

f_4 [3] Coupe en travers au sommet de la grande arche 5mm

f_3 — Plan du dessus de la grande arche — 1mm5 (S_1)

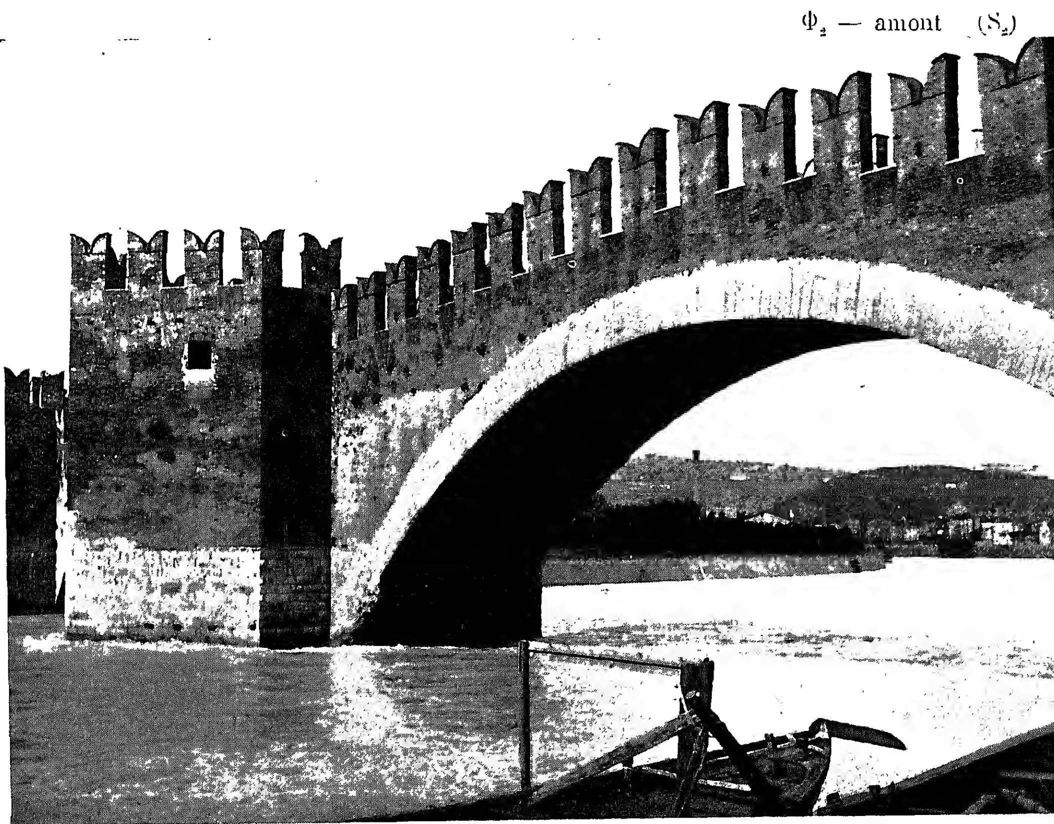


La largeur est (S_1) :	entre têtes	entre parapets
au droit de l'imposte	7m35	6m50
au droit de la clef	6m80	5m95

3. — Relevé de M. de Dartein.

A-t-on voulu continuer la courbe du chemin d'accès ? Le cintre s'est-il déformé ? La voûte a-t-elle été mal exécutée ?

Φ_2 — amont (S₂)



2. Matériaux. — *A. Pile* (S_1). — La base, jusqu'à 4m environ au-dessus des eaux ordinaires, est revêtue d'assises horizontales de marbre blanc et rouge, de 0m56 de hauteur, en morceaux de 1m50 à 2m et jusqu'à 2m75 de longueur, quelques-uns empruntés à des monuments romains détruits.

Au-dessus, tout est en briques.

B. Bandeaux. — Les bandeaux ont des creux, des bosses, des surplombs.

Les voussoirs en pierre de taille calcaire, en général sans saillie sur les tympans ni sur la douelle, sont fort irréguliers d'épaisseur, de hauteur et d'extrados. Ils ne sont pas ravalés. Quelques-uns ont leur face oblique sur la tête. Aux reins, à l'amont, quelques-uns sont cassés.

C. Douelle. — La douelle, en briques dont beaucoup sont creusées, est traversée, d'une tête à l'autre, d'assises de pierre de taille calcaire.

D. Dimensions des briques (S_1). — $22^{cm} \times 13^{cm}5 \times 6^{cm}5$ $27^{cm} \times 13^{cm}5 \times 5^{cm}5$.

3. Dates (S_1). — Le pont a été commencé en 1354 par Can Grande II della Scala, podestat de Vérone, en même temps que le Vieux-Château auquel il sert d'accès du côté du fleuve. La construction n'aurait duré que 3 ans (1354-1356) [4].

François Ier d'Autriche le fit réparer en 1824.

4. Ingénieurs (S_1). — Peut-être Jean de Ferrare et Jacques de Gozzo, qui auraient, 20 ans après, construit le pont « *delle Navi* » à Vérone [5].

4. — De 1345 à 1377, on a construit en Italie 5 grands ponts :

1345 (date donnée par Ferroni). — Pont Vieux « *Ponte Vecchio* » dit aussi Pont des Orfèvres, sur l'Arno, à Florence, dû à Taddeo Gaddi. — Arc du milieu : 29^m189, et 4^m176 de flèche.

« *De la véritable courbe des Arches du Pont de la Trinité, à Florence* ». — Mémoire géométrique et historique de Pierre Ferroni. — Inséré dans le tome XIV de la Société italienne des Sciences (1808).

1351-1356. — Pont couvert, sur le Tessin, à Pavie. — 6 arches : les 3 plus grandes en arc, - 2 petites en plein cintre, - une intermédiaire qui parait en plein cintre (S_1).

D'après une inscription sur la première pile rive gauche, rapportée par Malibran, on a commencé en 1351 à le *réparer* ou à le *refaire*.

Morandière en donne (Pl. 61, fig. 1 *à* 5) des dessins d'après Malibran. — La plus grande arche, celle de rive droite, a, à l'échelle, environ 28^m.

J'ai contrôlé ces dessins par mes photographies.

Gauthey donne un dessin et une description fort détaillée d'un pont saugrenu, qui n'a rien de commun avec l'ouvrage existant : 7 ogives égales, tympans évidés en triangle, pile à coupe horizontale en forme de lentille (*Construction des Ponts*, tome 1, p. 22, Pl. 1, fig. 21, 21 bis, — Paris 1809).

1354-1356. — Pont du Vieux-Château, sur l'Adige, à Vérone. — 3 arcs — $\widehat{A}^n$ p^{te} (< 40^m).

1373-1375. — Autre Pont sur l'Adige, à Vérone, dit « *delle Navi* », ruiné plusieurs fois par des crues. — 4 arcs de 16^m80, 24^m50, 15^m35 et 22^m40 (S_1), construit sous Can III della Scala (ou Can Signorio), frère de Can II.

1370-1377. — Pont de Trezzo, sur l'Adda, ruiné en 1116. — Arc de 72^m — $\widehat{A}^1$ p^{te} (> 40^m). — Tome III.

5. — Ils sont désignés comme Ingénieurs du Pont de Pavie par Torello Saraina dans son « *Histoire de Vérone* », 1649. — (Malibran : Mission d'Italie).

SOURCES :

S_1. — G. B. Biadego : « *Del Ponte nuovo sull' Adige a Verona* », Vérone, Turin, 1885. Memoria IV, p. 251, Pl. XVIII. — Cette planche indique le pont tel qu'il a été dessiné, à la fin du XVIIIe siècle, par l'Ingénieur Bertolini, Professeur au Collège militaire.

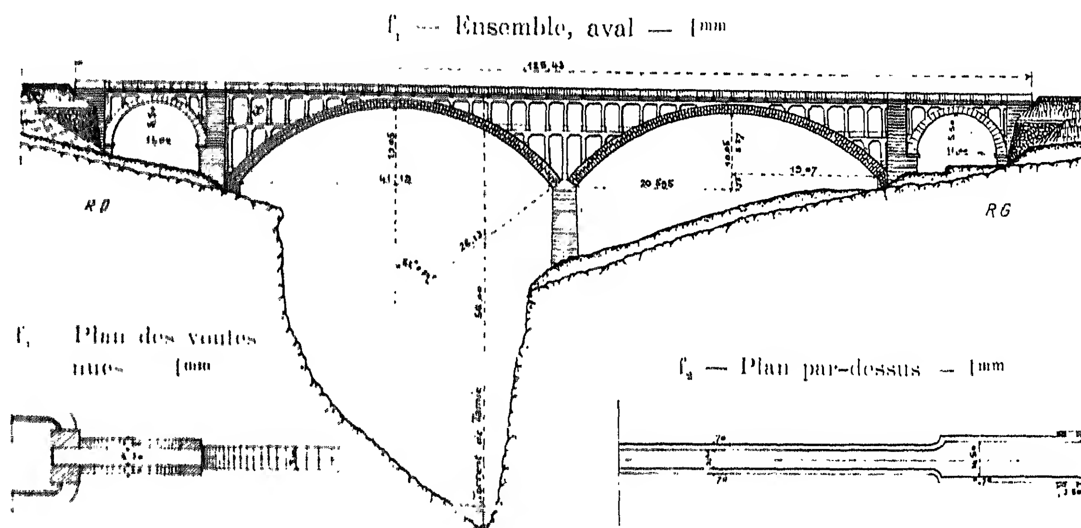
S_2. — Ce que j'ai vu, — juin 1908.

PONT SUR LE RUISSEAU DE TAMIÉ, PRÈS DE SEYTHENEX[1] *(Hte-SAVOIE)*

Chemin vicinal ordinaire

1908-1911 $\widehat{A}^n r^{le} (\geq 40^m)^2$

f1 — Ensemble, aval — 1mm



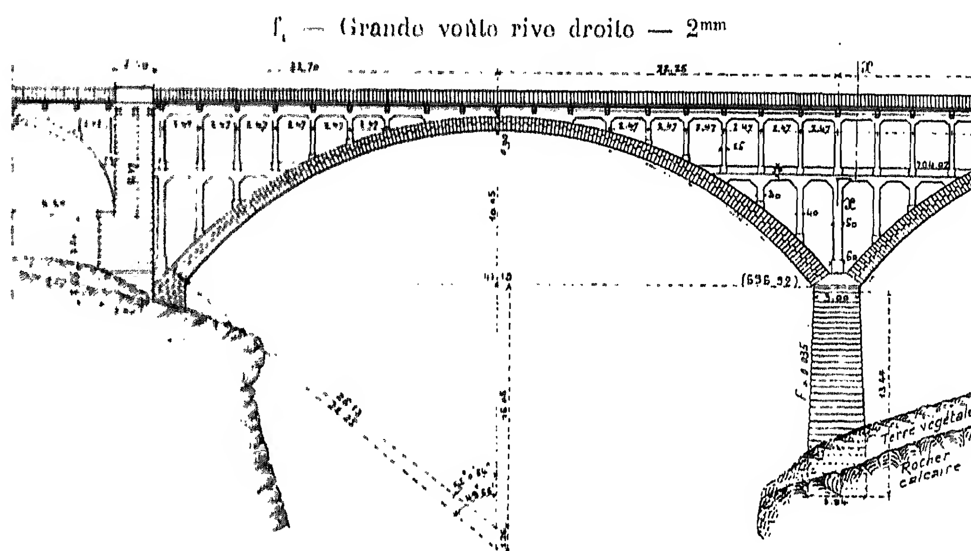
f2 Plan des voûtes nues — 1mm

f3 — Plan par-dessus — 1mm

1. Pourquoi deux grandes arches ? — L'arche de 39m665, rive gauche, ne paraît pas imposée.

Peut-être aurait-on facilement ajusté aux lieux une grande voûte rampante au-dessus du creux, et un viaduc d'accès sur le glacis de rive gauche.

f4 — Grande voûte rive droite — 2mm

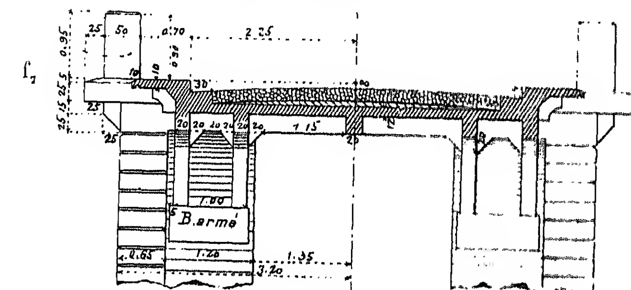


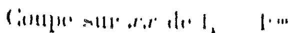
2. Arches d'accès en deux anneaux. — On a élargi à bon compte les entrées du pont, en plaçant un plancher en béton armé sur deux anneaux de voûte (f2, f3).

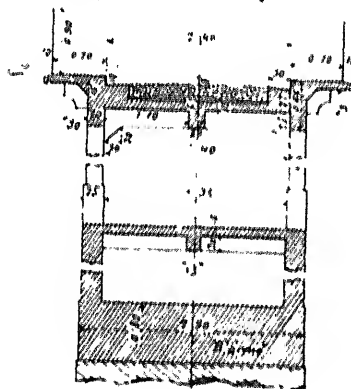
1. A 4k de Faverges (station de la ligne d'Annecy à Albertville).

f_5 — Coupe en long — 3mm

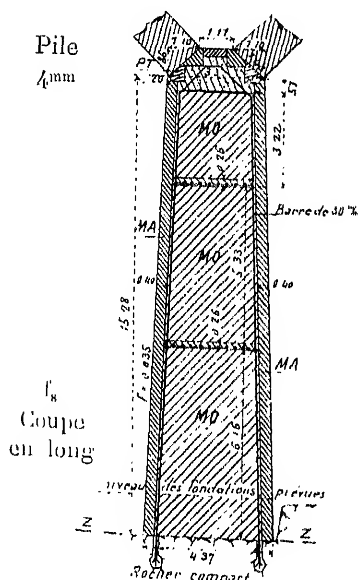
Coupe sur *yy* de f_5 — 1cm




Coupe sur *xx* de f_4 — 1cm

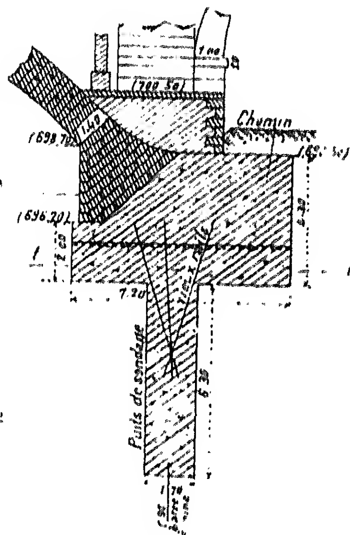


Pile 4mm

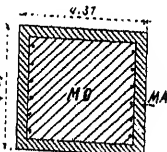


f_8 Coupe en long

Culée rive gauche 4mm

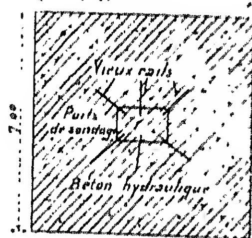


f_{10} Coupe en long



f_9 Coupe horizontale sur *zz* de f_8

f_{11} Coupe sur *tt* de f_{10}



3. Matériaux (S_1). — Sont : en béton armé : le tablier sous la chaussée, les colonnes qui le portent, le plancher entre les anneaux des arches d'accès (f_5, f_7); en maçonnerie, le reste.

4. Pile et culées (S''_1) (f_8, f_{10}). — La pile est armée ; elle est ancrée dans des poches creusées à l'acide dans le rocher.

Comme les culées, elle est traversée par des dalles en béton armé pour répartir les pressions, prévenir ou arrêter les fissures (f_8, f_{10}).

5. Joints de dilatation (S''_1). — Le tablier sous chaussée est coupé à 4m70 de chaque côté des clefs et à l'aplomb des naissances.

Φ₁² (S'''₁)

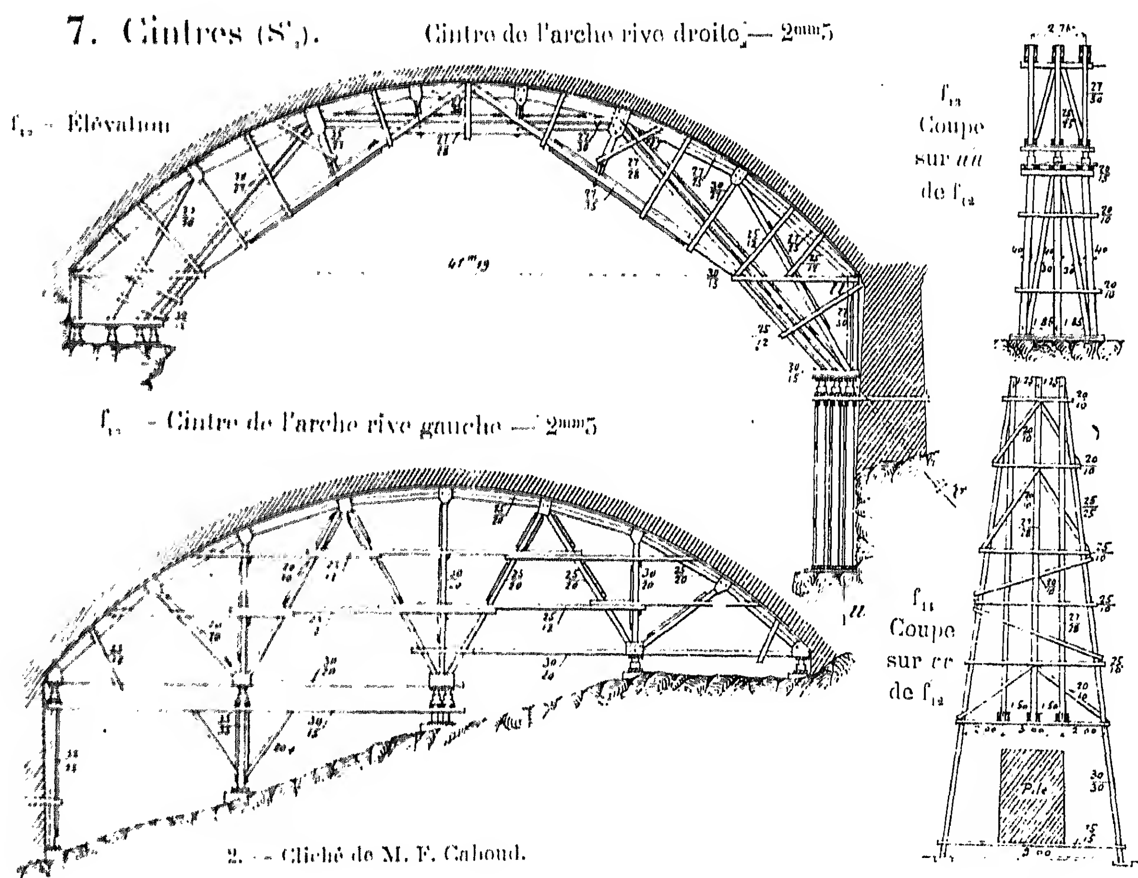


6. Fondation de la culée rive gauche (f_{10}, f_{11}). — Un sondage de 13m50 n'a pas atteint le rocher.

On a fondé sur un massif de béton de 8m × 7m30 × 3m50, armé dans les deux sens, de 54 barres de 25mm.

On a rempli le puits de sondage de béton, qu'on a relié au massif de fondation par 6 vieux rails.

7. Cintres (S'₂).



2. — Cliché de M. F. Caboud.

8. Décintrement (S''₁). — En matant les joints secs, on a exhaussé et décintré les voûtes. Aussi, pas de tassement au décintrement.

9. Dates (S''₁).

Commencement des travaux	septembre 1908
Fondations	octobre-novembre 1909
Grandes voûtes (construites en même temps)	2 avril 1910 - 15 novembre 1910
Décintrement	30 novembre 1911
Ouverture à la circulation	12 mars 1912

10. Quantités et Dépenses (S''₁).

1° Travaux à l'Entreprise.

	Quantités	Prix à l'unité sans rabais	Prix totaux rabais de 2 % déduit
Fouilles	1032m³75	1f20 à 5f10	2565f94
Béton de fondation	245m³42	20f	4810f23
Dalles armées, dans la pile et la culée rive gauche — Béton	21m³58	50f	1057f42
Dalles armées, dans la pile et la culée rive gauche — Acier	3291k38	0f50	1612f78
Cintres (*forfait*)	"	"	17248f00
Pierres sèches	313m³44	6f60	2027f33
Maçonnerie à mortier — Moellons ordinaires	779m³01	14f10	10764f36
Maçonnerie à mortier — Moellons équarris	37m³37	23f10	845f98
Maçonnerie à mortier — Moellons d'appareil	270m³09	23f10	6114f30
Maçonnerie à mortier — Pierre de taille de Seythenex	420m³55	70f	28849f73
Maçonnerie à mortier — Pierre de taille de Ruoms (*dés des garde-corps*)	29m³68	100f	2908f64
Parements vus de maçonnerie — Moellons équarris	158m²34	1f65	256f03
Parements vus de maçonnerie — Moellons d'appareil	816m²62	4f40	3521f27
Parements vus de maçonnerie — Pierre de taille de Seythenex	1219m²85	7f00	8368f17
Parements vus de maçonnerie — Pierre de taille de Ruoms	126m²84	8f50	1056f58
Indemnités allouées			7987f00
Plate-forme et piliers en béton armé (216m³), garde-corps en fer, chaussée (*forfait*)			30000f00
Total des travaux à l'Entreprise			130003f76
2° Travaux en régie, indemnités de terrains, divers			6339f57
Prix de revient total			136343f33

11. Personnel (S''₁).

Projet : M. Schœndœrffer, Ingénieur en chef ; — M. Pernoud, Agent-Voyer Principal.

Direction des travaux : M. Schœndœrffer, puis M. Reuss, Ingénieurs en chef ; — M. Pernoud ; — M. Millet, Ingénieur ordinaire.

Entrepreneurs { Maçonnerie et Cintres : M. Mercier ;
Béton armé : MM. Mazet et Limousin.

SOURCES :

S₁. — Dessins d'exécution (S'₁), renseignements (S''₁) et photographie (S'''₁) gracieusement communiqués par MM. Schœndœrffer et Reuss.

S₂. — Dessins du cintre (S'₂) et renseignements (S''₂) qu'a bien voulu m'adresser M. Pernoud.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ [1]

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série $\hat{A}^{n}F^{r}$ $(\geqslant 40^{m})$ [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4 :
1. — pour la définition des arcs « assez surbaissés »,
2. — pour le sens de ce symbole.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage* 1	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage 2	ENSEMBLE Largeurs entre parapets / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados 3	GRANDES VOÛTES INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon* 4	ÉPAISSEURS CORPS Clef *Retombées* 5	ÉPAISSEURS TÊTES Clef *Retombées* 6	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	PRESSIONS en kg 0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
de **Canale** *Autriche* 1904-1906 Ân Fr (⩾ 40m)[1] *4 voûtes en arc : 3 de 40m à 1/5 ; 1 de 30m à 1/3,7.* *4 voûtes d'accès en plein cintre : 2 de 6m (rive droite) ; 2 de 8m (rive gauche).*	*242m50* » 21m	5m16 voie en courbe *5m10* Fruit : 1/20 1m25	Arc de cercle **40m,00** *8m00* $\frac{1}{5} = 0,20$ *29m00*	1m,40 *2m10*	1m,40 *2m10*	L.[1] Calcaire Bandeaux : bossages Douelle : taille plate *Ciment* 590k	Pression maxima : 35k " 2700k 1m³	1° Au-dessus de chaque pile en rivière, 7 voûtes transversales vues, de 2m50, sur piles de 1m20. 2° "

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, n° 6.

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D**
FONDATIONS	GRANDES VOÛTES							
	CINTRES				MODE DE CONSTRUCTION	**DÉCINTREMENT**	**TASSEMENTS** DE LA CLEF	
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses					
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle[2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité de surface utile S_p[3], de volume « utile » W[4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Voûte centrale						Voûte centrale :	$Q = 9200^{mc}$
Rocher calcaire	Retroussé	5	120mc	0mc39	2 rouleaux		$t_c = 40^{mm}$	$Q : S_p = 7^{mc}43$ $Q : W = 0^{mc}53$
»		»	2400k	7k9				
»		1m28					t'_v 0	
	»		18900f	61f9				
Épuisements. Dans les batardeaux, béton et argile	Coins	12mm						

	Fondations	Élévation	Ensemble
D	97650f	487200f	584850f
$D : S_p$	78f1	389f3	467f4
$D : W$	5f7	28f3	34f0
$D : Q$	»	»	63f6

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ
PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE Â^n F^r (> 40^m)

MONOGRAPHIES

PONT SUR L'ISONZO, PRÈS DE **CANALE**[1] *(AUTRICHE, - Küstenland)*
Ligne d'Assling (Carinthie) à Trieste, par Goritz[2] - Wocheinerbahn.

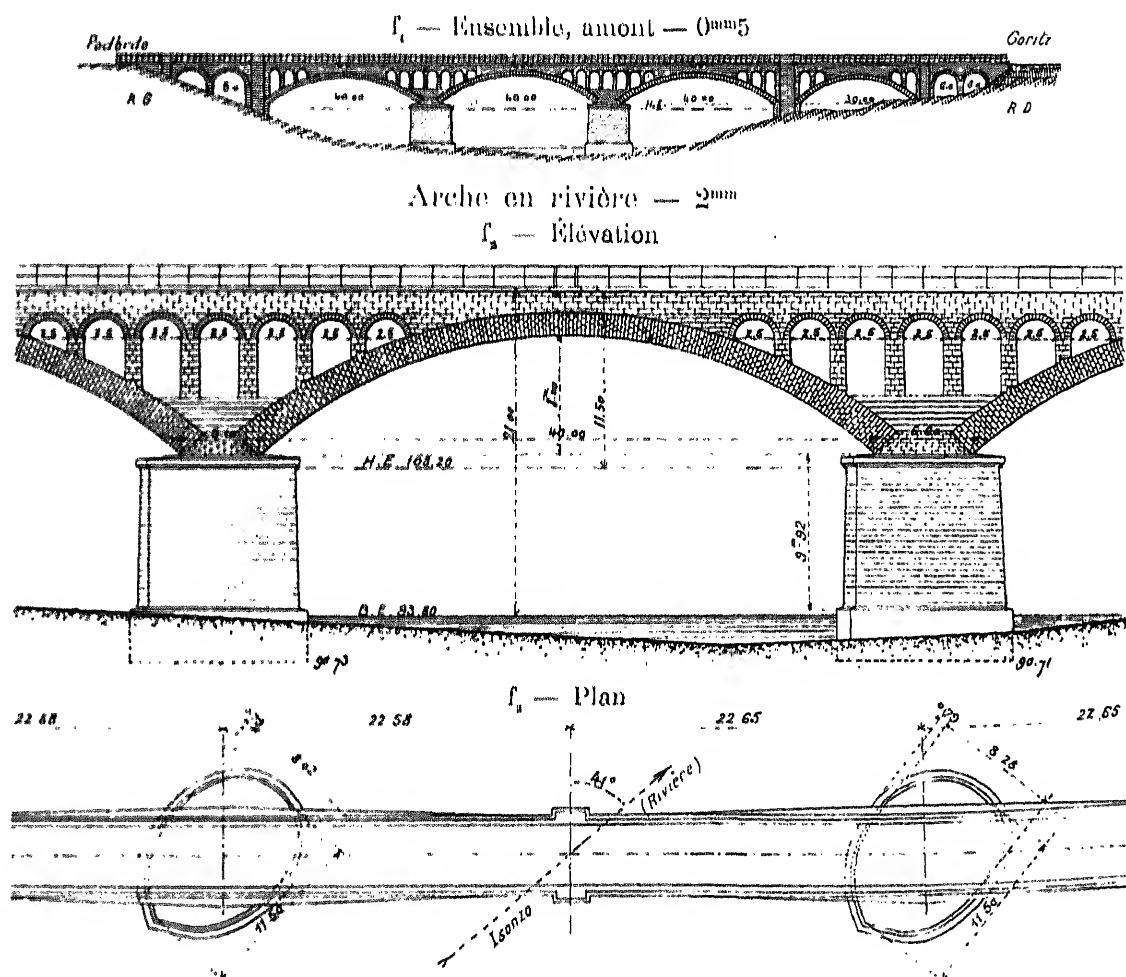
1904-1906 Â^n F^r (> 40^m)[1]

f_1 — Ensemble, amont — 0^{mm}5

Arche en rivière — 2^{mm}

f_2 — Élévation

f_3 — Plan



1. Piles biaises. — Le pont est droit sur piles à section ovale (f_3) orientée suivant le courant des crues, là, très violentes (S_1).

1. — à 1k environ en amont de la station de Canale.
2. — en allemand : *Görz.*

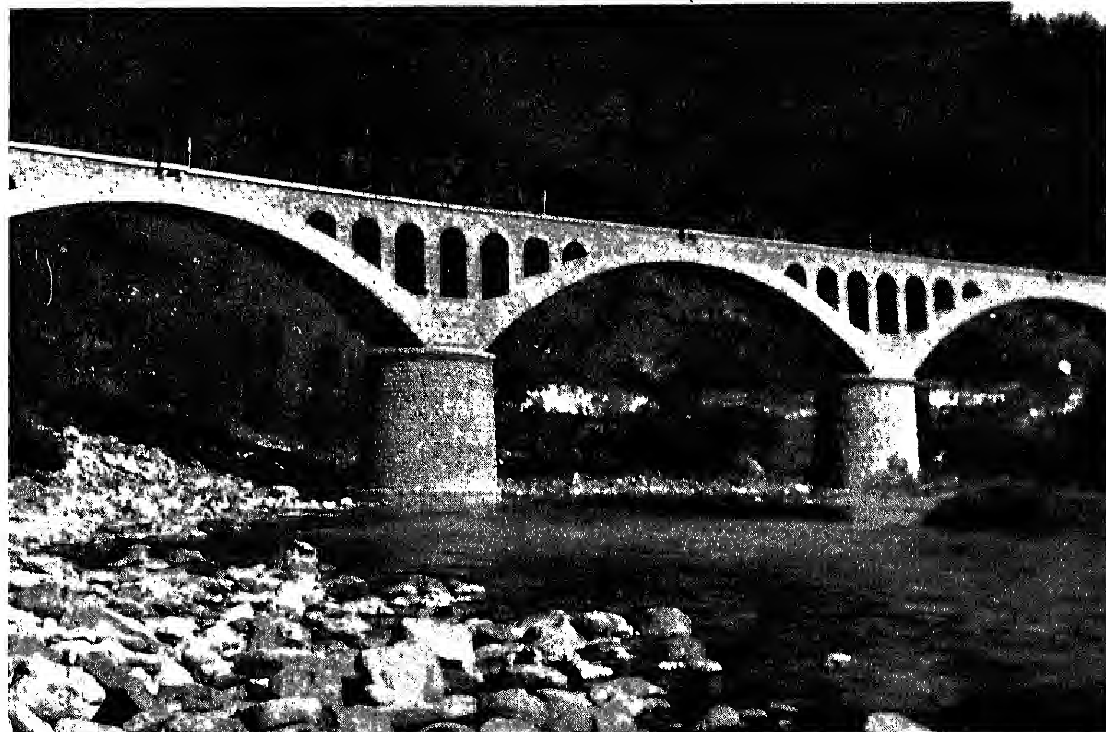
2. Aspect (S_3). — Ces grosses tours qui engoncent les retombées, on les accepte, à la réflexion, sans trop de difficulté.

On voit trop de tympan au-dessus des clefs.

Les refuges ne paraissent pas à leur place aux clefs des voûtes de 40^m.

Les pilastres de la voûte de 30^m ne portent rien.

Φ_1 — Les 3 arches de 40^m (S_3)



3. Matériaux (S_3). — L'ouvrage est, comme il convient, simplement traité.

Les tympans et les pilastres sont en moellons grossièrement équarris à assises horizontales inégales.

Les piles sont parementées en gros libages.

4. Exécution des grandes voûtes. — Après clavage du premier rouleau, on exécuta le deuxième en partant des retombées et de la clef. « *Cette* « *méthode se montra excellente* » (S'_1).

5. Dates (S'_1).

Commencement des travaux................................	mars 1904
Fondations..	juillet — septembre 1904
Voûte centrale..	11 mai — 5 juin 1905
Décintrement..	9 août 1905
Ouverture à la circulation................................	juillet 1906

Φ_2 — Cintres (S''_1)



6. Personnel (S'_1).

Projet et Direction des Travaux : M. l'Ingénieur Pabo Yelic « Baukommissär ».

Entrepreneurs : MM. Sard, Lenassi et Cie.

SOURCES :

S_1. Renseignements (S'_1) et photographies (S''_1) gracieusement donnés par le Ministère des Chemins de fer à Vienne.

S_2. Geschichte der Eisenbahnen des œsterreich-ungarischen Monarchie, - VI Band. - 1898-1908, II Band, « *Der Brückenbau der neuen Alpenbahnen. - A. Steinbrücken.* » Josef Zaffer, p. 74 à 87.

S_3. Ce que j'ai vu — octobre 1908.

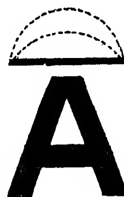
S_4. Le Genie Civil, 2 mai 1908 : « *Les nouvelles lignes de chemins de fer dans les Alpes « autrichiennes* », F. Hofer, p. 1 à 6, Pl. I.

Les dessins sont réduits de S_4.

VOÛTES INARTICULÉES

EN

ARC TRÈS SURBAISSÉ [1]


[2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4 :
1. pour la définition des arcs « très surbaissés »,
2. pour le sens de ce symbole

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS ROUTE

Série $\widehat{A}^{1} r^{t.e}_{(\geqslant 40^{m})}$ [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 1 et 4 :
1. pour la définition des arcs « très surbaissés »,
2. pour le sens de ce symbole.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole 1	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage 2	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados 3	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon* 4	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées* 5	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées* 6	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1m³ de sable, de chaux ou de ciment* 7	PRESSIONS en kg par 0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
Mosca à **Turin** *Italie* 1834 A¹ rle (⩾ 40m) 1	*91m* » 7m	12m18 » Pas de fruit »	Arc de cercle **45m,00** *5m50* $\frac{1}{8,182}$ = 0,122 *48m773*	**1m,50** *2m,50*	1m,50 »	PT¹ Granit *Chaux grasse de Palazzolo 150*		1° » 2° *Voussure en corne de vache*
de **Teinach** *Allemagne* 5mm 5mm 1882 A¹ rle (⩾ 40m) 2	*43m* 6m60	6m20 *5m60* Pas de fruit »	Au-dessus du sol, Arc de cercle **33m,00** *3m30* $\frac{1}{10}$ 0,10 *42m927* Sur le sol de fondation, Portée : **46m,00**	**1m,00** *1m,60* *α = 22° 46′ 17″*	1m,00 *1m60*	Au-dessus du sol, PT¹ Épaisseur [illegible] 10 tirants de 60mm × 10mm Grès à 300k *Ciment Portland 1000k* *A la clef et aux retombées 1500k*	Pression maxima Clef : 29k3 Retombées 27k5 sur le béton de fondation 11k *Méry* 400k au m²	1° 3 voûtes longitudinales en plein cintre de 1m, sur murs de 0m50 Barres filetées entre tympans 2° »
de **Huzenbach** *Allemagne* 30mm 30mm 1889 A¹ rle (⩾ 40m) 3	*35m75* 6m50 étiage	3m80 *3m00 entre bandeaux* Pas de fruit »	Aux retombées sur le béton : **35m,00** *4m70* $\frac{1}{7,44}$ = 0,134 Sur le sol de fondation, Portée : **41m,50**	**0m,60** *0m,95*	0m,60 *0m88*	PT¹ grossière Grès	Pression maxima Clef 40k Retombées 52k *Méry*	1° Pas d'évidement 2° »
de **Wengern** *Allemagne* 40mm 40mm 1904 A¹ rle (⩾ 40m) 4	» 7m	7m,00 *5m50* Pas de fruit 0m35	Arc d'anse de panier **50m,00** *5m50* $\frac{1}{9,10}$ = 0,11	**1m,20** *2m,00*	1m,20 *2m00*	Voûte en petits moellons Aux têtes, crépi simulant de grandes PT¹ *Ciment 0m³ 333*	Pression à la clef 20k	1° 2 vides longitudinaux de 1m90. Mur entre eux de 0m50 Dessus, une plate-forme en béton armé 2° »

1\. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

SÉRIE Ā¹ rle (> 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/0m01² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois, Poids de fer, Dépenses Totaux	 par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4].
10	11	12	13	14	15	16	17	18
» » » *Pilotis*	Retroussé soutenu au milieu » Coins	10 » » *261mm*			A pleine épaisseur Voussoirs posés à sec Lames de plomb : aux reins, à l'intrados ; au cerveau, à l'extrados ; ailleurs, coins en fer.	» *Décintrement commencé 20 jours après le clavage.* »	t'_v (après 5 jours) 153mm t''_v (après 4 mois) sous charge de 3000 T = 41mm y compris l'enfoncement des culées	D = 1 348 552f (Pont et abords) D : S_p = 1216f7 D : W = 137f5
Grès – 8m (RD) Pression maxima : RD 5k RG 5k5 *Épuisements*	Fixe réemployé en 1886, au Pont de Marbach Ā rle (40m) Tome IV Montants et contrefiches » Boîtes à sable	5 *2.5m* »			A pleine épaisseur 3 joints secs aux retombées Voûte clavée en même temps à la clef et aux retombées	Voûte une *12 jours* »	t_c 10mm t'_v 43mm t''_v après 42 j. 24mm t''_v après 90 j. 17mm t'_v + t''_v 84mm	(voir ci-dessous, a)
Gneiss » Pression maxima : 4k5 »	Retroussé sur 10m » »		» » 1641f	» » 15f8		» *23 jours* »	t'_v 60mm t''_v 20mm t'_v+t''_v 80mm	(voir ci-dessous, b)
» » Pression : 3k *Béton, armé de rails.* *Pilotis*								

(a) Colonne 18, deuxième ouvrage :

	Fondations	Élévation	Ensemble
D [6]	22212f	30850f	53062f
D : S_p	83f3	115f7	199f0
D : W	14f6	20f3	34f9

6. Non compris la surveillance.

(b) Colonne 18, troisième ouvrage :

	Fondations	Élévation	Ensemble
D	1740f	9983f	11723f
D : S_p	12f8	73f5	86f3
D : W	2f0	11f3	13f3

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) – C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole 1	PROJET — ENSEMBLE: *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage 2	PROJET — ENSEMBLE: Largeurs entre parapets / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados 3	GRANDE VOÛTE — INTRADOS: Portée *Montée* Surbaissement *Rayon* 4	GRANDE VOÛTE — ÉPAISSEURS — CORPS: Clef *Retombées* 5	GRANDE VOÛTE — ÉPAISSEURS — TÊTES: Clef *Retombées* 6	GRANDE VOÛTE — MATÉRIAUX: *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	GRANDE VOÛTE — PRESSIONS en $kg/\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
de **Ziegenhals** *Allemagne* 1905 $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)5	» 40^{mm} 40^{mm} 5^m50	» » » 0^m35	Arc d'anse de panier à 3 centres $40^m,00$ *4^m20* $\frac{1}{9,52} = 0,105$ *Rayons :* *Cerveau : 60^m* *Reins: 25^m676*	$0^m,85$ *1^m70*	$0^m,85$ *1^m70*	Voûte en petits moellons Aux têtes, crépi simulant de grandes PT[1] *Ciment — $0^{mc}333$*		1° Pas d'évidements. 2° »
de **Michelau** *Allemagne* 1905-1906 $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)6	*55^m60* 50^{mm} 50^{mm} 6^m70	5^m00 *4^m60* Pas de fruit 0^m40	Arc d'anse de panier à 3 centres $42^m,00$ *5^m20* $\frac{1}{8,07} = 0,124$ *Rayons :* *Cerveau : 50^m* *Reins: 26^m637*	$0^m,80$ *1^m30*	$0^m,80$ *1^m30*	Comme au Pont de Ziegenhals $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)5 Le crépi des têtes est à 1 de ciment, 4 de sable	Pression maxima : sans surch. / avec surch. Clef: 18^k6 / 22^k Joint de rupt.: 25^k1 / 29^k4 Retombées: 13^k / 15^k3 Surcharge : $600^k/1^{mq}$	1° 2 voûtes transversales vues, en plein cintre de 3^m80. 2° »
de **Neuhammer** *Allemagne* Projet : 1905 $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)7	*109^m70* » »	6^m00 *6^m00* » 0^m35	Arc d'anse de panier à 3 centres $52^m,00$ *6^m00* $\frac{1}{8,7} = 0,115$	$1^m,05$ *1^m80*	$1^m,05$ *1^m80*	Comme au Pont de Ziegenhals $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)5 La douelle est enduite de ciment		1° Pas d'évidements. 2° »
de **Schwusen** *Allemagne* 1907 $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)8	*72^m00* 25^{mm} 25^{mm} 8^m50 (sol)	5^m00 *4^m60* Pas de fruit 0^m40	Arc d'anse de panier à 3 centres $48^m,00$ *5^m75* $\frac{1}{8,347} = 0,119$ *Rayons :* *Cerveau : 60^m* *Reins : 40^m*	$0^m,90$ *1^m30*	$0^m,90$ *1^m30*	Comme au Pont de Ziegenhals $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)5		1° 2 voûtes transversales vues, en plein cintre 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

SÉRIE $\bar{A}^1$ 1re (> 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

EXÉCUTION								CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D**
	GRANDE VOÛTE							
	CINTRE							
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses					
FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg/0m01² *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	**DÉCINTREMENT** État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	**TASSEMENTS DE LA CLEF** sur cintre t_o au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
» » » *Béton, armé de rails* *Pilotis*								
Pression maxima : sans surcharge 5k9 avec surcharge 6k4	Fixe Montants et contrefiches » »	**6** » à partir des têtes 0m95 0m85 0m80 »				» *41 jours* 6 juillet		Q = 675mc Q : S_p = 2mc43 Q : W = 0mc39
Rocher » Pression : 3k								
» » » *Pilotis* *Pieux verticaux et pieux inclinés*	Fixe Montants et contrefiches » »	**7** » à partir des têtes 0m85 0m70 0m65 »						

	Fondations	Élévation	Ensemble
D	14314f	26408f	40722f
D : S_p	51f5	95f0	146f5
D : W	8f2	15f4	23f6
D : Q	»	»	60f4

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, nº 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, nº 7 — *B*.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs { entre parapets / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS { Portée / *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1 m. de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg $\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEME[NT] DES TYMPA[NS] 2° *DÉCORAT[ION] DES TÊT[ES]*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Kupferhammer** *Allemagne* 1907 **Ā**[1] rte (≥ 40m)	» 33mm 33mm 7m 10 étiage	» » » 0m 45	{ 48m,00 / *5m75* $\frac{1}{8,347}$ = 0,119	{ 0m,90 / *1m,30*		Comme au Pont de Ziegenhals **Ā**[1] rte (40m)	Pression maxima : Clef / Retombées sans surcharge 21k1 / 17k2 avec surcharge complète 24k5 / 19k7 sur une culée 33k8 *Courbe de pression par le milieu de la clef et des retombées* 400k m² Rouleau de 15t	1° 2 voûte[s] transvers[ales] vues, en plein c[intre] 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

SÉRIE A[1] r^le (> 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE (*Suite*)

FONDATIONS	EXECUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES		CINTRE — Cube de bois, Poids de fer, Dépenses		MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q — DÉPENSE D
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_0 au décintrement t'_v après t''_v	Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
"								
"								
"								
Pilotis *Pieux verticaux et pieux inclinés.*								

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\bar{A}^1$ r^{te} $_{(\geqslant 40^m)}$

MONOGRAPHIES

PONT MOSCA, SUR LA DORA RIPARIA, A TURIN

via Ponte Mosca

1834 (S_2) $\bar{A}^1$ r^{te} $_{(\geqslant 40^m)}$ 1

Φ_1 (S_3)



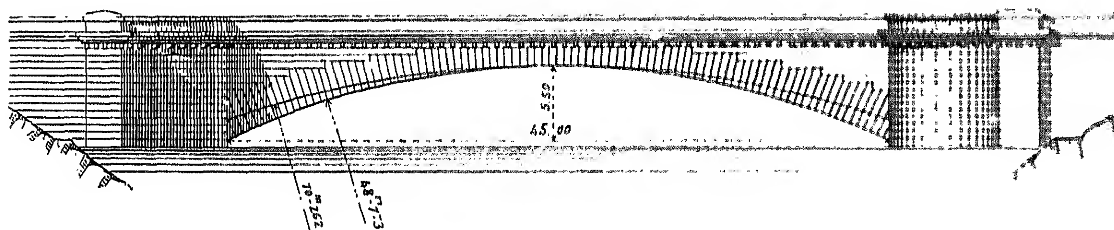
1. Le pont Mosca est imité du « *Pont d'une arche de 150 pieds « d'ouverture, projeté* (par Perronet) *pour être construit sur chacun « des deux bras de la Seine à Melun* » [1]. — Le projet de Perronet comportait, comme le pont Mosca, une arche unique en arc sur l'axe, avec cornes de vache aux têtes, bandeaux à crossettes sans saillie sur les tympans. C'est bien le même pont.

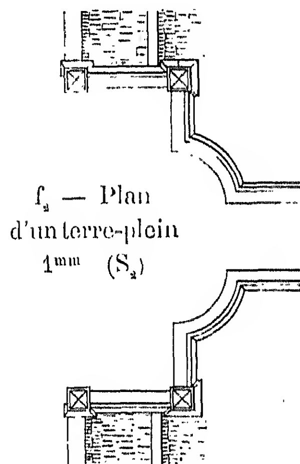
1. — Perronet : « *Description des projets et de la construction des Ponts de Neuilly, de Mantes, « d'Orléans, et autres* », Tome second, Paris, Imprimerie Royale MDCCLXXXII, p. 31, 32, 33, Pl. XLIV.

Voici, comparées, les principales dimensions des deux projets :

	Projet de Perronet		Pont Mosca
Portée	150 Pieds	48m726	45m
Intrados — Rayon — de la voûte	200 Pieds	64m968	48m773
Intrados — Rayon — de la corne de vache	300 Pieds	97m452	70m262
Intrados — Surbaissement — de la voûte	1 10,2		1 8,2
Intrados — Surbaissement — de la corne de vache	1 15,7		1 12,2
Épaisseur à la clef	5 Pieds	1m624	1m50
Largeur — entre têtes	39 Pieds	12m668	
Largeur — entre parapets			12m18 (S_2)

f_1 — Élévation — 2mm (S_2)





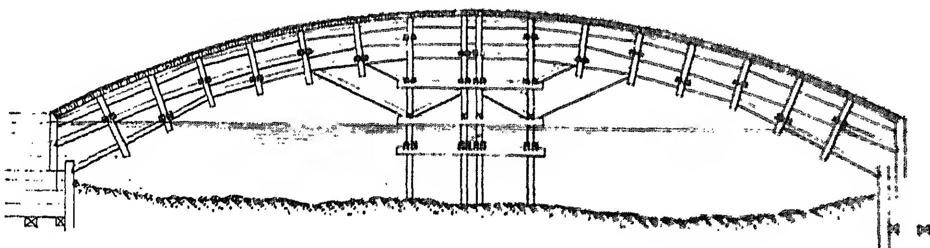
f_2 — Plan d'un terre-plein 1mm (S_2)

Les culées, beaucoup plus larges que le corps central, s'y raccordent :

au Pont de Perronet, par de courtes courbes concaves ;

au Pont Mosca, par deux tours rondes convexes (f_2), comme au Vieux Pont de Lavaur[2].

f_3 — Cintre 2mm5 (S_2)



2. Cintre. — C'est à peu près exactement le projet de Perronet pour Melun[3]. Les appuis au cerveau ne devaient servir qu'en cas de besoin. « *L'apla-*

2. — $\mathbf{E}^1$ 1re (> 40m)2 — Tome I.
3. — Perronet *Loc. cit. renvoi I.* Pl. XLIV.

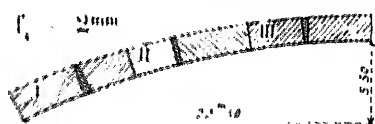
« tissement de la grande voûte exigera d'en soutenir le cintre..... avec trois files « de forts pieux dans leur milieu..... : le dessous du milieu de chaque ferme de « cintre sera disposé de manière qu'elle soit isolée à 2 pieds de distance de ce point « d'appui, pour n'y avoir recours que lorsqu'on le trouvera convenable pendant « la construction de la voûte. Cet intervalle de 2 pieds sera garni de pièces de « charpente, taillées en forme de coins, qui serviront, en les ôtant lors du décin- « trement, à faciliter le décintrement des couchis. » [4]

On mit 45 jours à tailler et monter les fermes.

3. Fondations. — Cette grande voûte très plate a été fondée sur pilotis, comme Perronet l'avait prévu pour son pont de Melun [5]. C'était hardi.

4. Exécution de la voûte. — Deux maçons seulement, servis par quelques manœuvres, posèrent en 75 jours, sans aucun accident, les 651 voussoirs de la voûte : ils pesaient de 5 à 8 tonnes, sauf ceux de la première assise des naissances, qui pesaient de 15 à 18 tonnes.

Comme au pont de Nemours [6], on tint les joints plus larges là où, d'après les expériences de Perronet et de Boistard, on craignait les écrasements, c'est-à-dire à l'intrados des reins, à l'extrados du cerveau.



Considérons 3 tronçons (f_4). Dans le tronçon I voisin des naissances, les joints étaient plus larges à l'intrados qu'à l'extrados ; dans le tronçon II, ils étaient égaux ; dans le tronçon III, ils étaient plus minces à l'intrados.

Les épaisseurs des joints dans les tronçons I et III variaient suivant une certaine progression.

Les intervalles entre les assises étaient maintenus aux reins de l'intrados et au sommet de l'extrados par des lames de plomb ; dans le corps de la voûte, par des coins en fer.

Les voussoirs des assises des naissances étaient liés par des crampons en fer.

Tous les voussoirs étant en place, sur cales, les joints vides furent remplis avec du mortier de chaux et de sable propre en parties égales, retenu en douelle par de l'étoupe.

Puis, on retira les coins en fer.

5. Décintrement. — Au moment de décintrer, on dégrada sur 3cm tous les joints d'intrados et d'extrados.

6. Durée d'exécution. — 4 ans.

4. — Perronet. *Loc. cit., renvoi I*, p. 31, in fine.

5. — id. Pl. XLIV.

6. — Projeté par Perronet en 1771, puis modifié. Construit par Boistard, de 1795 à 1804. — Arcs de 16m25 au 1/15,3.

7. Dépense. — Pont et abords...................... 1.348.552f37 [7, 8]

8. Ingénieur. — Mosca [9].

7. — « *Sulle Cause che produssero la ruina del ponte in muratura sul Liri* ». Conferenza dell' Ingegnere Pasquale Sasso, — Naples, 1880.
Morandière (S_2) donne 1.400.000f.

8. — Il était estimé 710.000 lires dans un devis signé le 10 janvier 1823 par C. Mosca « Capitano Ingegnere di 1a classe di Ponti e Strade ». « *Capitoli d'appalto per la costruzione d'un ponte ad un sol arco sulla Dora Riparia presso Torino* ». Turin, Imprimerie royale, 1823. (Bibliothèque de l'École des Ponts et Chaussées. Fonds italien. N° 4871.

9. — Il est porté comme Élève de notre École des Ponts et Chaussées, aux Annuaires de 1811 1812 (3e classe), 1813 (1re).

SOURCES :

S_1. — Transactions of the Institution of Civil Engineers, - volume I, 1836, p. 183 et suivantes : « *Details of the construction of a Stone Bridge erected over the Dora Riparia near* « *Turin* » by chevalier Mosca, — M. Albano, A. Inst. C. E.

S_2. — Morandière, Construction des Ponts, p. 302, Pl. 61, fig. 8 à 11 ; Pl. 136, fig. 7 : « *Pont de Turin, sur la Dora* ».

S_3. — Ce que j'ai vu — octobre 1903.

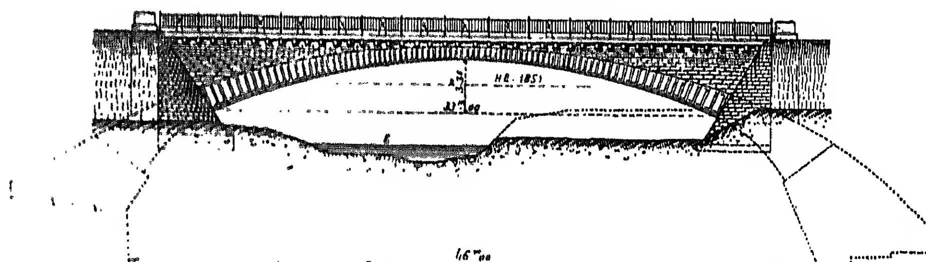
Tout ce qui n'est pas spécifié S_2 ou S_3 est de S_1.

PONT SUR LA NAGOLD, A TEINACH[1] (*ALLEMAGNE, – Wurtemberg*)

Route de Nagold à Calw

1882 — A[1] r[de] (≥ 40m)2

f_1 — Élévation — 2mm



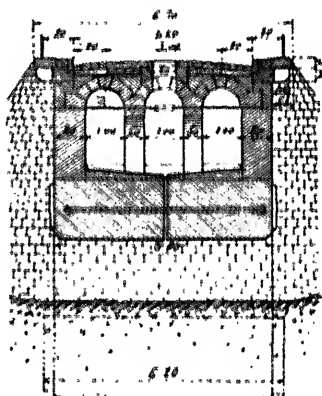
1. Grande voûte. — C'est la première grande voûte du Wurtemberg (S_2). On l'a faite par économie[2] et pour faciliter le flottage.

Les dimensions en ont été fixées « *d'après les principes appliqués en France* « *pour de grands ponts récents* ».[3]

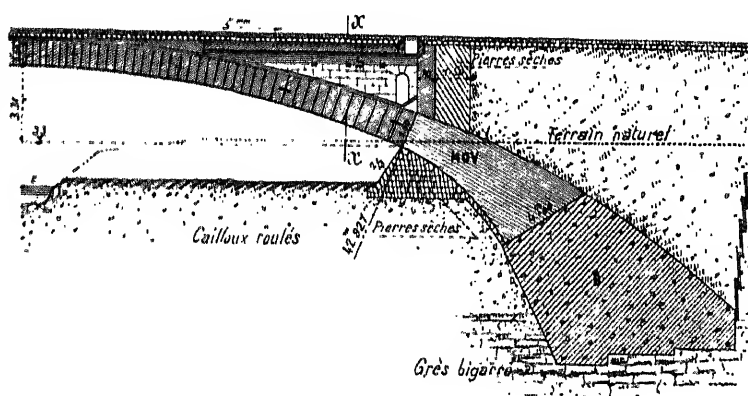
2. Chaussée. Trottoirs. — La chaussée est empierrée. Ses pentes de 5mm écoulent mal les eaux.

Les trottoirs, asphaltés, sont en porte-à-faux de 0m55 sur consoles ancrées dans les tympans.

f_4 — Coupe en travers sur *xx* de f_3 — 5mm



f_3 — Coupe en long — 3mm



1. — Près de la gare, — Ligne de Pforzheim à Horb, à 30k de Pforzheim.

2. — On avait estimé (S_1) :

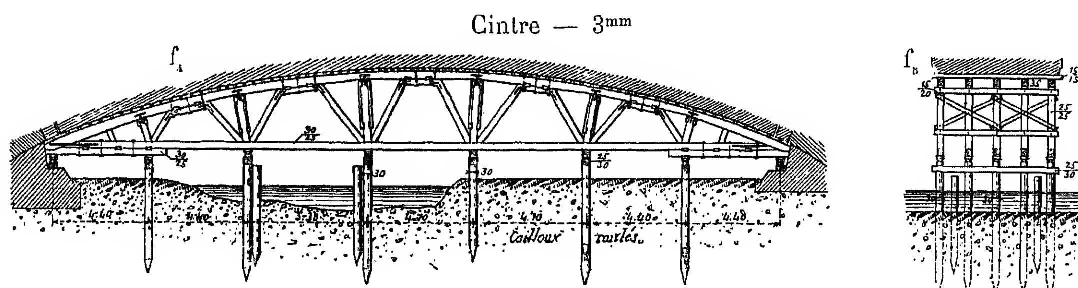
3 anses de panier de 11m40, 12m40, 11m40	63.000 Mark.
3 arcs de cercle de mêmes portées	60.000
2 arcs de cercle de 17m	55.000
1 arc de cercle de 33m à culées verticales	53.000
1 arc de cercle de 33m à culées perdues	46.000

3. — « *Die Bemessung der Querschnittsdimensionen des Brückenbogens erfolgte nach den Grundsätzen* « *welche neuerdings bei grossen Brücken in Frankreich in Uebung gekommen sind.* » (S_1).

3. Chape. — Sous la chaussée, enduit lissé de ciment, puis feutre asphalté de 7^{mm}, puis 10^{cm} de sable ; sous les évidements, chape en ciment.

La voûte n'a pas été traversée par l'eau.

Cintre — 3^{mm}



4. Cintre. — Les bois travaillaient au plus à 30^k ; on plaçait une feuille de plomb aux abouts des pièces fatiguées.

Pas de platelage : chaque assise était posée sur un couchis.

Les boîtes à sable, en fonte, à section carrée de 25/25, étaient reliées électriquement à la chambre du gardien.

Le sable était lavé, séché, et garanti de la pluie par une tôle.

5. Fondations. — On posa dans le béton 1/3 de grosses pierres, par assises normales à la courbe de pression.

Après 1 jour à l'air et 6 jours à l'eau, le mortier à 1/3 devait résister à une tension, par $\overline{0^m01}^2$, de 4^k (ciment prompt)[4], 5^k (ciment lent)[4].

La maçonnerie de moellons ordinaires lités, au-dessus du béton (f_3), fut faite au mortier de ciment à 1/3 en bas, 1/1 en haut, par assises normales à la courbe de pression.

Quand on fut arrivé aux retombées de la voûte, on s'arrêta pour laisser durcir le béton.

6. Exécution de la voûte. — On déposa tous les voussoirs près de leur place définitive. Les pistons des boîtes à sable s'enfoncèrent de 10^{mm}.

Avant de poser une assise, on vérifiait l'emplacement de son couchis.

On posa aux retombées 3 assises à sec[5] : à l'extrados, sur lattes de peuplier tendre de 1^{cm} d'épaisseur et 40^{cm} de long ; à l'intrados, sur des cordes de chanvre entourées de caoutchouc, de 16^{mm} d'épaisseur, à 15^{cm} de la douelle.

Le caoutchouc employé se comprima trop : le joint se réduisit à l'intrados à 5^{mm}, au lieu des 10^{mm} prévus.

On posa les voussoirs à sec, assise par assise, en garnissant d'étoupe les joints par lesquels le mortier aurait pu s'échapper. On mouillait les joints et on versait du mortier très fluide qu'on fichait ensuite ; puis, une heure après, on enlevait l'étoupe.

4. — Stuttgarter Cementfabrik — Blaubeuren.

5. — « *comme au pont de Claix* » (S_4) $\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^1$ r^te^ ($\geqslant$ 40^m)^5 — Tome III.

On a regretté de n'avoir pas donné aux joints 15mm au lieu de 10mm.

On coula du mortier en même temps aux assises de clef et aux joints secs des retombées.

On avait constaté que le cintre, mouillé par les pluies, s'était élevé de 15mm à la clef : un peu avant de claver, on en arrosa copieusement le sommet.

7. Décintrement. — Il fut opéré par 20 hommes.

Les boîtes à sable n'avaient qu'un orifice : deux se rompirent.

8. Fissures et tassements. — De légères fissures apparurent à l'extrados de la retombée rive droite[6]. Elles disparurent 6 semaines après, l'ouvrage achevé.

La voûte a tassé :

au décintrement (voûte nue), de.................... 43mm.

à l'achèvement de l'ouvrage, de.................... 67mm.

Au bout de 3 mois, le tassement atteignit son maximum.. 84mm.

On ne constata aucune nouvelle fissure pendant 5 mois.

D'après les calculs basés sur les expériences de Bauschinger, la contraction de l'arc devait être 34mm, le tassement de la clef, 22mm.[7]

Il est possible que les poches d'argile sableuse, que contient le rocher de fondation, se soient détrempées et aient tassé sous le poids de la voûte.

9. Durée d'exécution.

	en semaines
Fouilles et bétonnage (travail de nuit avec des torches à l'huile minérale).	7
Maçonnerie de moellons ordinaires lités, en fondation, sur le béton (f_4)...	3
Grande voûte en pierre de taille........	3
Maçonneries au-dessus de la voûte........	6

10. Personnel. — *Projet et Direction des Travaux :* M. Leibbrand, « Oberbaurat » à Stuttgart.

Direction locale : M. Paul Braun « Baumeister » à Calw.

6. — C'est pour les éviter, qu'en Wurtemberg on articulera désormais les grandes voûtes (S_2).

7. — La contraction en microns μ par mètre pour le grès de Bavière est de : 150 μ, sous 10k ; - 300 μ, sous 20k ; - 370 μ, sous 30k ; - 450 μ, sous 40k.

SOURCES :

S_1. — Zeitschrift für Baukunde, 1883, Heft 6, p. 347 à 356, Pl. 26 : « *Steinbrücke über die Nagold bei Teinach (Württemberg)* », Stuttgart, im juni 1883, Leibbrand.

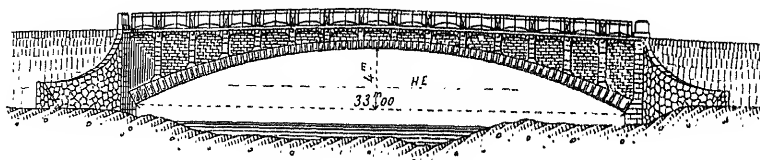
S_2. — Zeitschrift für Bauwesen 1888, p. 235 à 260, Pl. 38 et 40 : « *Steinbrücken mit gelenkartigen Einlagen* ». — Stuttgart, novembre 1887, Leibbrand, - Kgl. Ober-Baurath.

Tout ce qui n'est pas spécifié S_2 est de S_1.

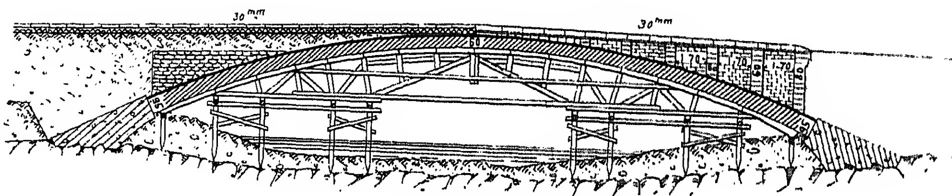
PONT SUR LA MURG, A HUZENBACH[1] *(ALLEMAGNE, - Wurtemberg)*

1889 **A**' r[le] (> 40m)3

f_1 — Élévation — 2mm



f_2 — Cintre et demi-coupes en long — 2mm5 (S''$_1$)
sur l'axe | en avant du tympan



1. — à 10k environ en aval de Baiersbronn.

SOURCES :

S_1. — Fortschritte der Ingenieurwissenschaften, - Zweite Gruppe, 7 Heft : « *Gewölbte* « *Brücken* », von Karl von Leibbrand, Präsident der K. Württ. Ministerial-Abteilung für den Strassen-und Wasserbau.

S'$_1$ — Tableaux statistiques, p. 22.

S''$_1$. — Dessins, Pl. I, fig. 35 à 39.

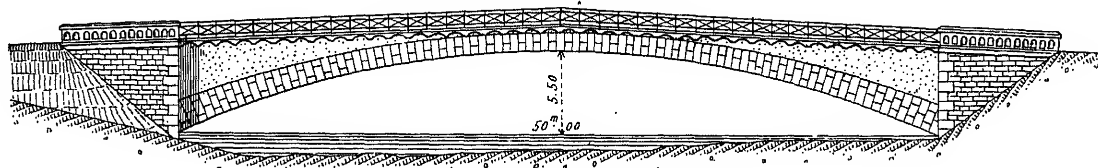
PONT SUR LA MALAPANE, A WENGERN

(ALLEMAGNE, - Silésie, - Cercle d'Oppeln)

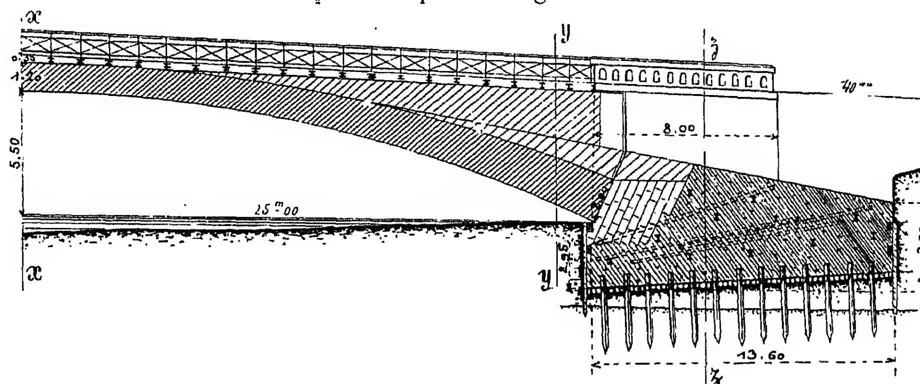
Route d'Oppeln à Yellowa

1904 (S₁) A¹ rte (≥ 40m) 4

f₁ — Élévation — 2mm

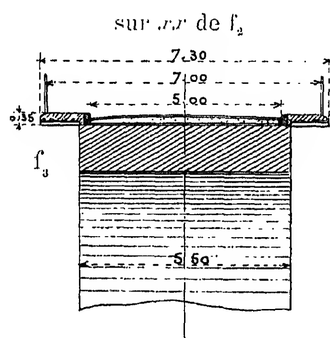


f₂ — Coupe en long — 3mm

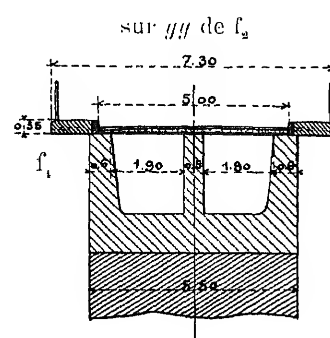


Coupes en travers — 5mm

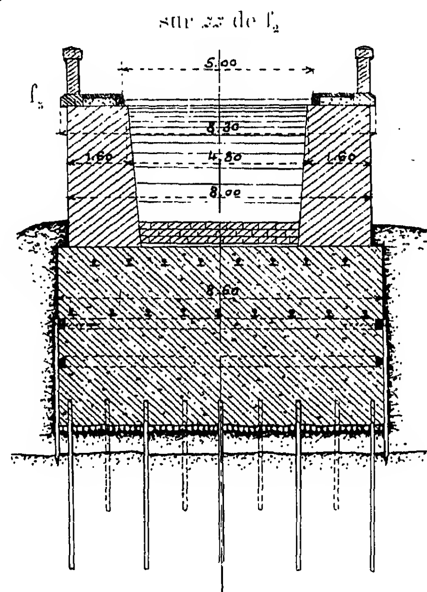
sur xx de f₂



sur yy de f₂



sur zz de f₂



1. Personnel. — *Projet et Entreprise :* MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

SOURCE :

S₁. — Dessins d'exécution qu'ont bien voulu me remettre MM. Liebold, en 1908.

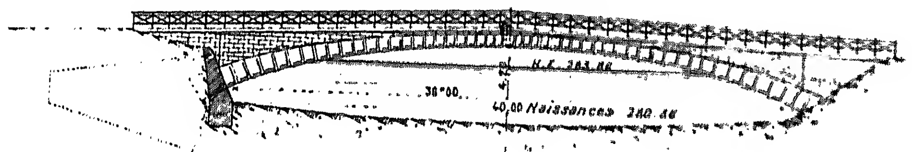
PONT SUR LA FREIWALDAUER BIELE, A **ZIEGENHALS**

(ALLEMAGNE, – Silesie, – Cercle de Neisse)

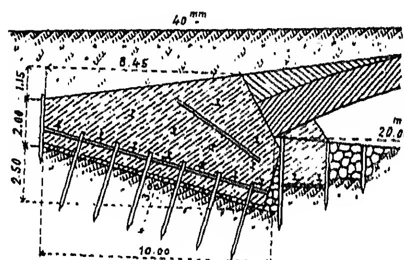
Route de Ziegenhals à Zuckmantel

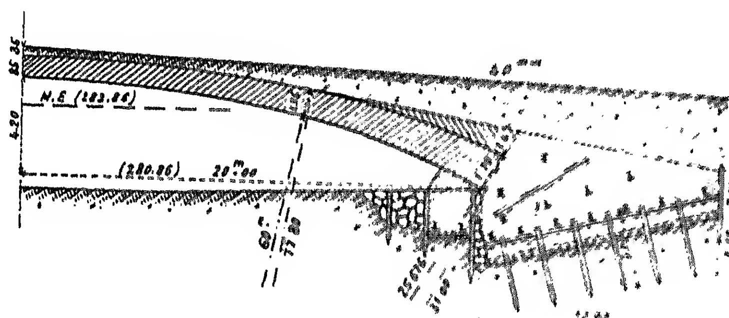
1905 $\bar{A}^1$ r^{le} (C = 40^m,5)

f_1 — Élévation 2mm



f_2 — Coupe en long 3mm





1. Personnel. — *Projet et Entreprise :* MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

SOURCE :

S_1. — Dessins d'exécution que m'ont gracieusement remis MM. Liebold, en 1908.

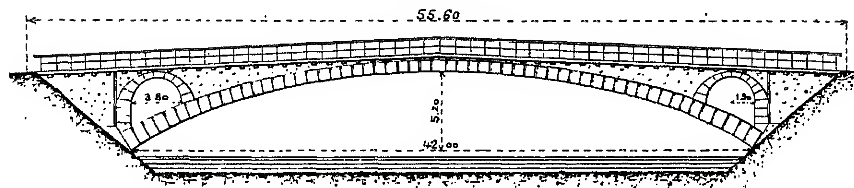
PONT SUR LA GLATZER NEISSE, A MICHELAU

(ALLEMAGNE, – Silésie, – Cercle de Brieg)

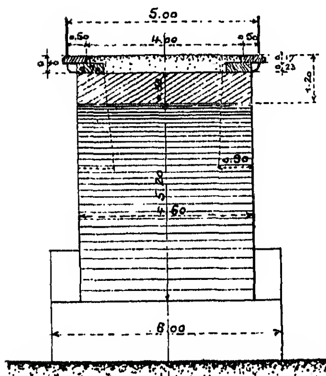
Route de Michelau à Gross Saarne

1905-1906 $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)6

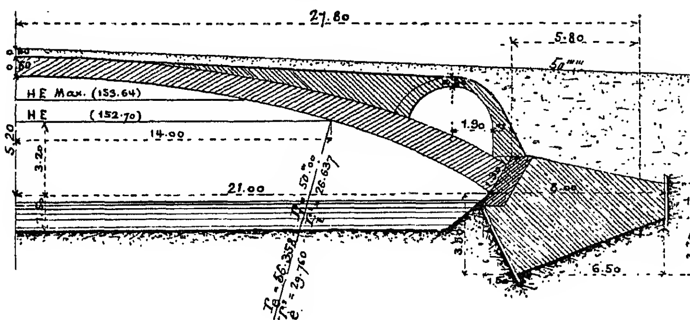
f_1 — Élévation — 2^{mm}



f_3 — Coupe en travers à la clef — 5^{mm}

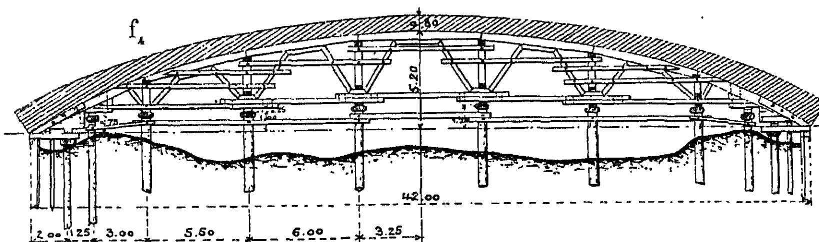


f_2 — Coupe en long — 3^{mm}

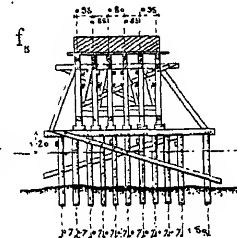


Cintre — $2^{mm}5$

f_4



f_5



1. Dates (S_2).

Commencement des travaux..................................	27 septembre 1905
Grande voûte..	15-26 mai 1906
Décintrement..	6 juillet 1906
Ouverture à la circulation..................................	24 août 1906

Φ_1 (S_2)



2. Personnel (S_2) — *Projet et Entreprise :* MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

Direction des Travaux : M. Schleicher, « Regierungsbaumeister ».

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution qu'ont bien voulu me remettre MM. Liebold, en 1908.

S_2. — Renseignements et photographie que m'a gracieusement adressés, en juillet 1909, M. Gretschel « Landesbaurat », à Breslau.

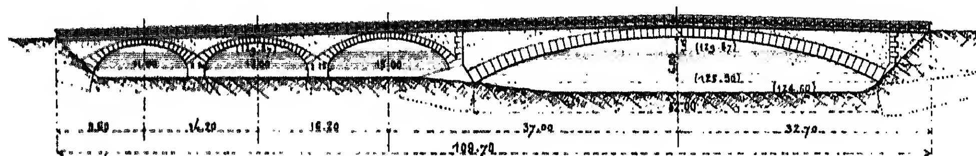
PONT SUR LA QUEIS, A NEUHAMMER

(ALLEMAGNE, – Silésie, – Cercle de Sagan)

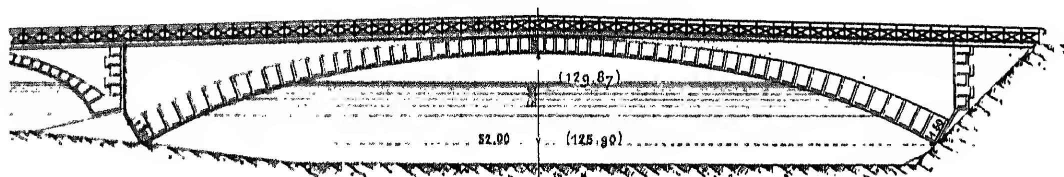
Route du village à la gare

Projet : 1905 (S_1) . **A** ^{1} P^{le} (~ 40m)7

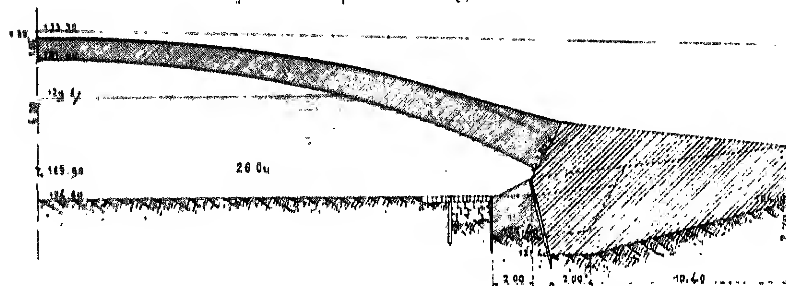
f_1 — Ensemble — 1mm



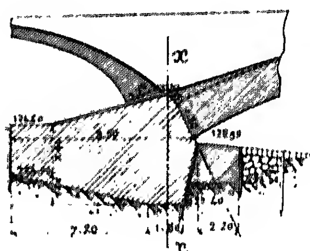
f_2 — Grande arche — 2mm



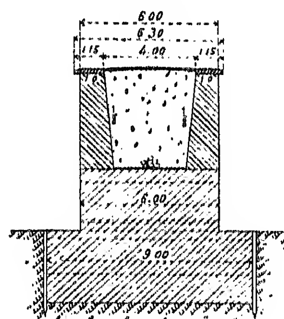
f_3 Coupe en long — 2mm5



f_4 Culée 2mm5

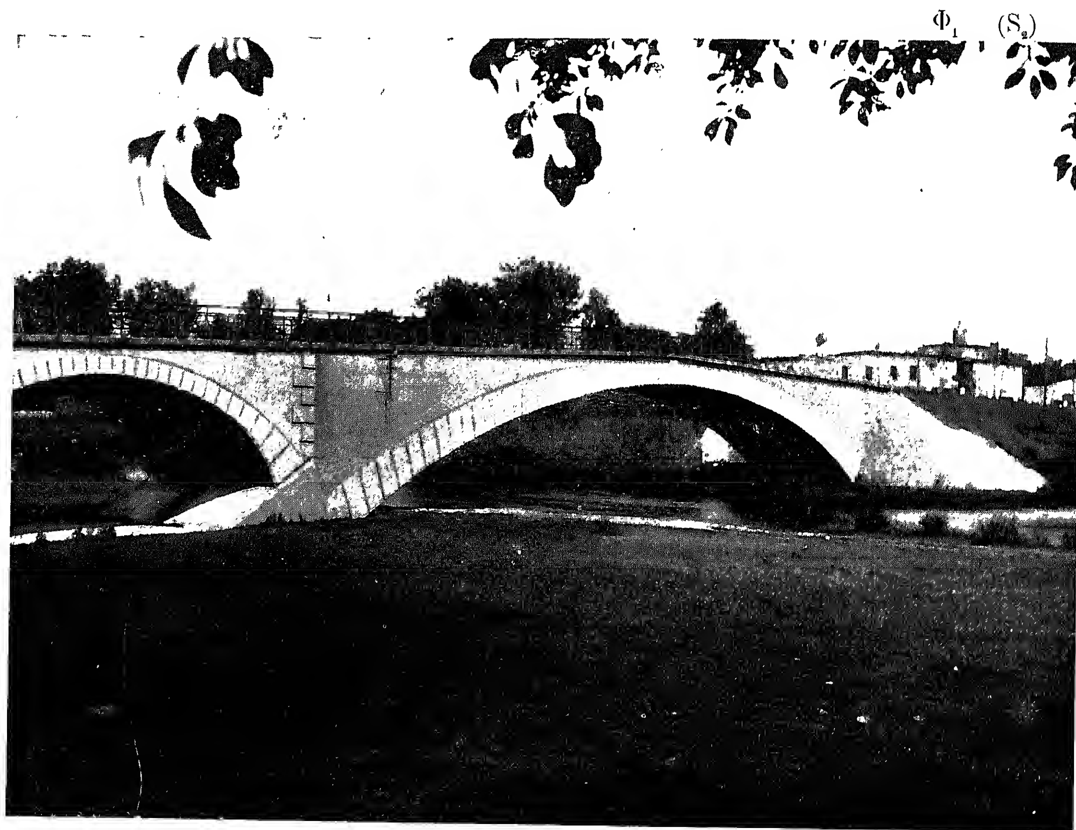


f_5 — Coupe en travers sur xx de f_4 — 3mm



1. Aspect (S_2). — On a simulé de très grosses pierres de taille aux têtes et aux chaînes d'angle.

Φ_1 (S_2)



Les tympans sont crépis. La douelle est barbouillée de mortier.
On paraît s'être peu préoccupé de l'aspect.

2. Personnel. — *Projet et Entreprise :* MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution qu'ont bien voulu me remettre MM. Liebold, en 1908.

S_2. — Ce que j'ai vu — août 1909.

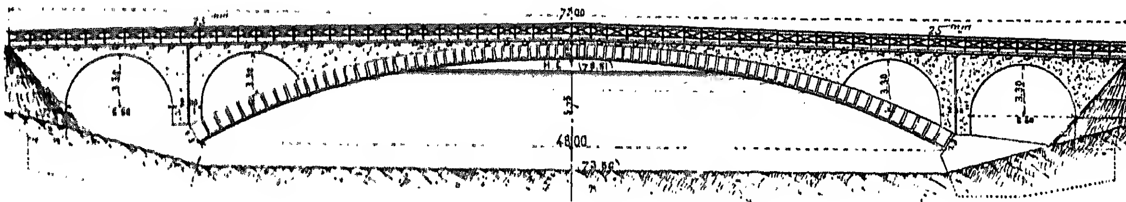
PONT SUR LA BARTSCH, A SCHWUSEN

(ALLEMAGNE, — Silésie, — Cercle de Glogau)

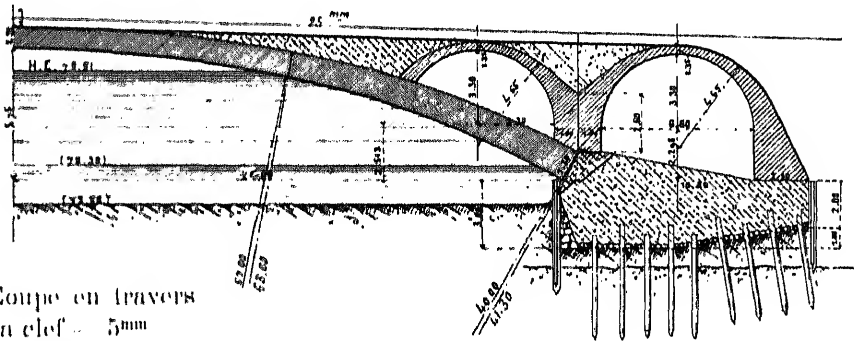
Route de Schwusen à Fraustadt

1907 **A**' r[te] (> 40m) 8

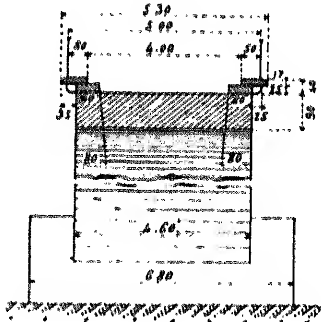
f_1 — Élévation — 2mm



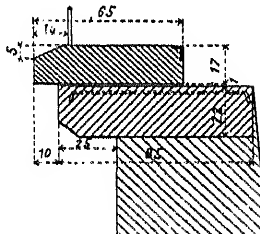
f_2 — Coupe en long — 3mm



f_3 — Coupe en travers à la clef — 5mm

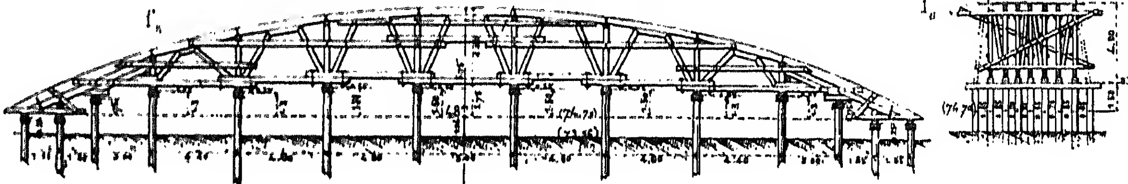


f_4 Couronnement 3cm



Cintre — 2mm5

f_5 f_6



1. Personnel. — *Projet et Entreprise :* MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

SOURCE :

S_1. — Dessins d'exécution que m'ont gracieusement remis MM. Liebold, en 1908.

PONT SUR LA FREIWALDAUER BIELE, A KUPFERHAMMER

(ALLEMAGNE, – Silésie, – Cercle de Neisse)

Route de Weidenau à Neisse

1907 $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^{m}$)9

f_1 — Coupe en long — 3^{mm}

1. Personnel. — *Projet et Entreprise :* MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

SOURCE :

S_1. — Dessin qu'ont bien voulu me remettre MM. Liebold, en 1908.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS CONDUITE D'EAU

(AQUEDUCS)

Série $\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^{1}\text{aq}_{(>40^{m})}$ [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. [illegible] et 4.
1. — pour la définition des arcs « très surbaissés »,
2. — pour le sens de ce symbole.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CONDUITE D'EAU

PONT Date Symbole 1	PROJET — ENSEMBLE *Longueur de l'ouvrage* Déclivité Hauteur maxima de l'ouvrage au-dessus du sol ou de l'étiage 2	ENSEMBLE Largeur *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans 3	GRANDE VOÛTE — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon* 4	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées* 5	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées* 6	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	PRESSIONS en kg/0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
de **Weisenbach** *Allemagne* 1885 Ā¹ aq (⩾ 40m)[1]	» » »	*4m* *entre bandeaux* Largeur de la conduite : 2m20	40m,00 *5m00* $\frac{1}{8} = 0,125$	1m,35 *1m,70*		Béton fait à la main 1v – 2v,5 – 5v Ciment Dyckerhoff et fils de Biebrich Aux têtes, joints simulant de grandes pierres de taille	Pression Clef : 20k Naissances : 25k » 1m5 d'eau par m. ct	1° Voûtes transversales vues, en plein cintre 2° »

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, n° 6.

(AQUEDUCS) SÉRIE $\hat{A}^1$ aq (> 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION									CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D**
FONDATIONS	GRANDE VOÛTE								
	CINTRE				MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT	TASSEMENTS DE LA CLEF		
	FERMES		Cube de bois Poids de fer Dépenses						
Nature du sol Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0^m01^2 *Procédé*	Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Totaux	par mq de douelle [2]		État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v		Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17		18
	Fixe				Voûte construite par tranches de 4 à 5m séparées par des joints de 4c à l'intrados, 5c5 à l'extrados, matés après 7 semaines, (le retrait du béton achevé.)	Voûte nue *1 jour après matage* »	t'_v	0	

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation.
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE
SOUS CONDUITE D'EAU (AQUEDUCS)

SÉRIE $\bar{A}^1$ aq (> 40m)

MONOGRAPHIES

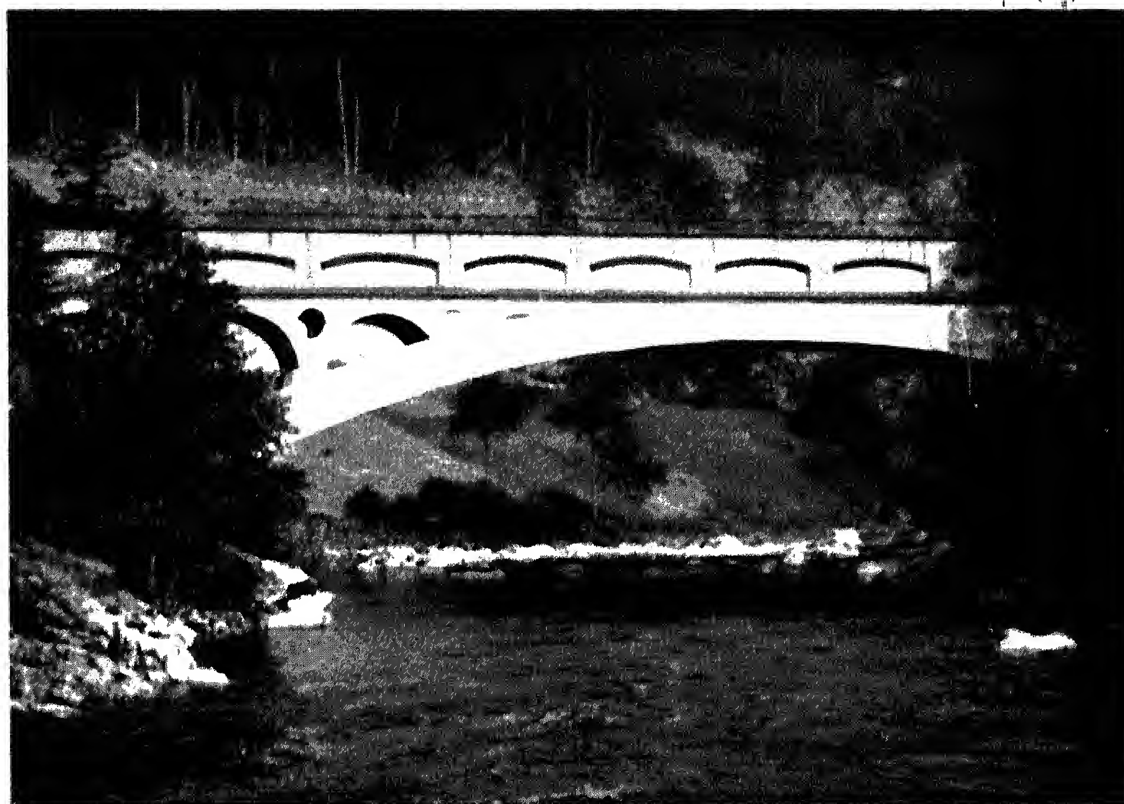
PONT SUR LA MURG, PRÈS DE WEISENBACH[1]

(ALLEMAGNE, — Grand Duché de Bade)

Canal d'amenée à l'usine Holzmann

1885 $\bar{A}^1$ aq (> 40m) 1

Φ_1 (S_9)



1. [illegible] à 3k environ en amont (S_9).

1. Exécution de la voûte (S_1). — On pilonnait le béton par couches parallèles à la douelle, entre cloisons transversales espacées de 4 à 5^m. On enlevait ces cloisons, puis on dressait les parois des tranches.

On n'a pas eu à soutenir les tranches des reins.

2. Date (S_1). — Le pont a été achevé à la fin de l'automne 1885.

3. Personnel (S_1).

Ingénieur : M. Karl von Muller, de Fribourg en Brisgau.

Entrepreneurs : MM. Thormann et Schneller, d'Augsbourg.

Le projet de cintre est de MM. Thormann et Stiefel.

SOURCES :

S_1. — Lettres de M. Karl von Muller à M. Max Leibbrand, Landesbaurat à Sigmaringen (7 et 9 août 1906), que M. Leibbrand a bien voulu me communiquer, — juillet 1909.

S_2. — Ce que j'ai vu — septembre 1908.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ [1]

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE

SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

Série $\mathbf{A}^{1}$ $F^{r}_{(\geqslant 40^{m})}$ [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4 :
1. — pour la définition des arcs « très surbaissés »,
2. — pour le sens de ce symbole.

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER

PONT Date Symbole	PROJET — ENSEMBLE: *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima du rail au-dessus du sol ou de l'étiage	PROJET — ENSEMBLE: Largeurs (entre parapets, *entre tympans sous la plinthe*) Fruit des tympans Revanche du rail sur l'extrados	GRANDE VOÛTE — INTRADOS: Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	GRANDE VOÛTE — ÉPAISSEURS — CORPS: Clef *Retombées*	GRANDE VOÛTE — ÉPAISSEURS — TÊTES: Clef *Retombées*	GRANDE VOÛTE — MATÉRIAUX: *Mortier* *Poids, pour 1 mc de sable, de chaux ou de ciment*	GRANDE VOÛTE — PRESSIONS en kg/0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Bellows Falls** *États-Unis* 1899 **A**¹ Fʳ (≥ 40ᵐ)1 *2 voûtes égales buttant contre le même rocher.* *Ce sont deux* **A**¹, *ce n'est pas un* **A**ⁿ.	*109ᵐ 98* » 24ᵐ38	Pas de parapets *8ᵐ 23* Pas de fruit 2ᵐ438 jusqu'au-dessus du rail	Arc de cercle 42ᵐ,672 *6ᵐ 096* $\frac{1}{7} = 0{,}143$ *40ᵐ 386*	1ᵐ,219 *1ᵐ 219* rouleau d'épaisseur uniforme	1ᵐ,219 *1ᵐ 219*	Bandeaux et Douelle : L [1] Hauteur uniforme.. 1ᵐ219 Épaisseur : Intrados....... 0ᵐ616 Extrados...... 0ᵐ635 Aux reins, à partir de 7ᵐ de la clef, remplissage en maçonnerie de 0 à 3ᵐ50 d'épaisseur *Ciment Portland*	Pression (Intrad. / Extrad.) *sans surcharge* Clef : 39ᵏ4 / 19ᵏ7 Retombées : 58ᵏ6 (effort MAX.) / 14ᵏ6 *avec surcharge* *1° sur toute la voûte* Clef : 49ᵏ7 / 24ᵏ1 A 16ᵐ de la clef : 25ᵏ8 / 54ᵏ7 (effort MAX.) Retombées : 53ᵏ7 / 36ᵏ1 *2° sur une 1/2 voûte* Clef : 50ᵏ5 / 16ᵏ a - 1/2 voûte chargée Retombées : 76ᵏ (effort MAX.) / 7ᵏ3 b - 1/2 voûte non chargée A 4ᵐ de la clef : 57ᵏ1 (effort MAX.) / 10ᵏ Retombées : 29ᵏ8 / 50ᵏ8 » 8940ᵏ/1mc¹	1° Pas d'évidements 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

A VOIE NORMALE SÉRIE $\bar{A}^1$ Fr (≥40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

[FO]NDATIONS [Nat]ure du sol [Pr]ofondeur [sou]s l'étiage [P]ressions [su]r le sol [en] kg/0m01² Procédé	EXÉCUTION — GRANDE VOÛTE — CINTRE — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	FERMES Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	Cube de bois Poids de fer Dépenses par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_a au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p [3] / de volume « utile » W [4]
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Rocher " " "	Arche sur la rivière : Retroussé sur 11m58 " Coins sous les couchis Arche de décharge : Fixe " Coins sous les couchis	6 25cm 1m539 *76mm*	Pour les 2 cintres : 548mc	0mc65	Joints matés à la spatule	Arche Est " *21 jours* " Arche Ouest " *30 jours* "	t_v 25mm t'_v 0	Q = 3069mc Q : S_p = 3mc39 Q : W = 0mc23 D = 282 310f y compris la démolition de l'ancien pont. D : S_p = 311f9 D : W = 21f1 D : Q = 92f0

[2. Pour] le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE
SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\bar{A}^1$ Fer ($>$ 40m)

MONOGRAPHIES

PONT DE BELLOWS FALLS, SUR LE CONNECTICUT

(ÉTATS-UNIS, — Vermont)

Ligne de Boston[1] à Montréal, par Fitchburg et Rutland

(Boston and Maine R.R.)

1899 $\bar{A}^1$ Fer (40m) 1

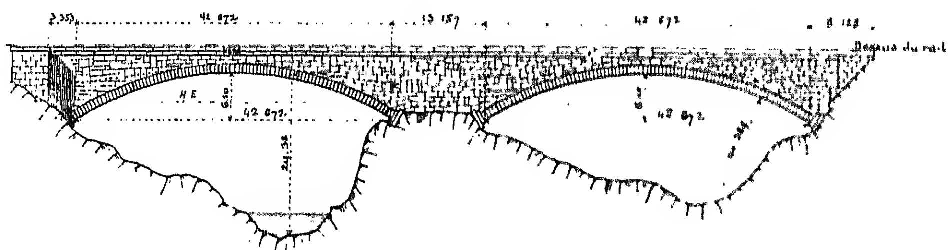
Φ_1 (S_2)



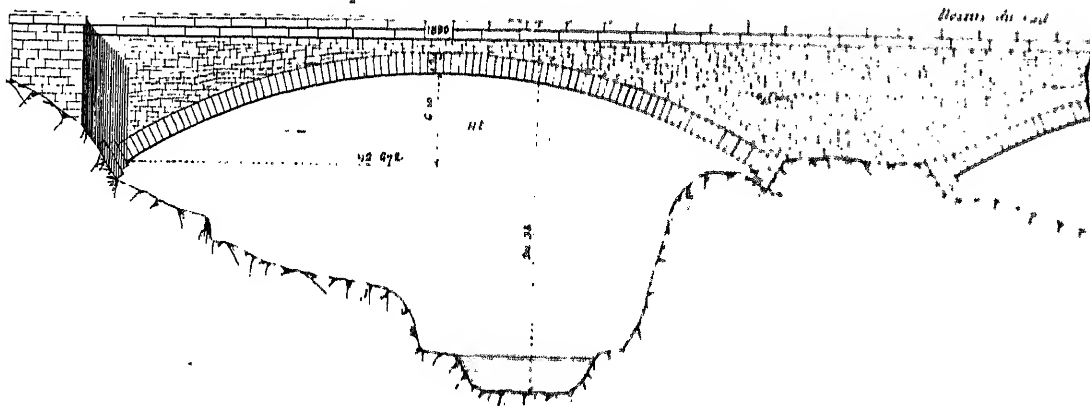
1. Pourquoi il est dans la série $\bar{A}^1$. — Ce n'est pas un pont à deux arches (A^n). Ce sont deux arches uniques buttant contre le même rocher.

[1] à 114 milles de Boston.

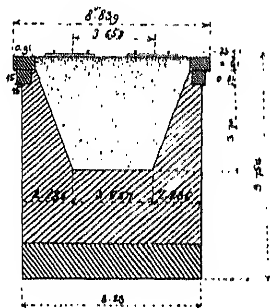
f₁ — Ensemble — 1mm



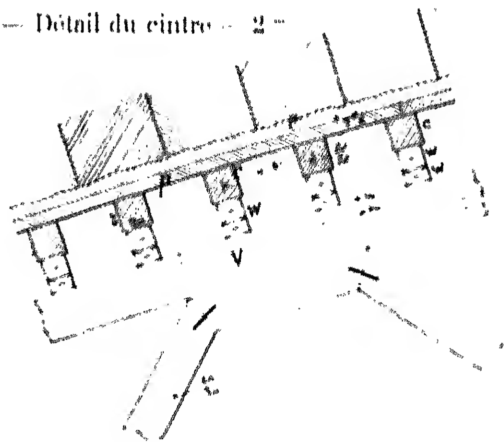
f₂ — Arche sur la rivière — 2mm



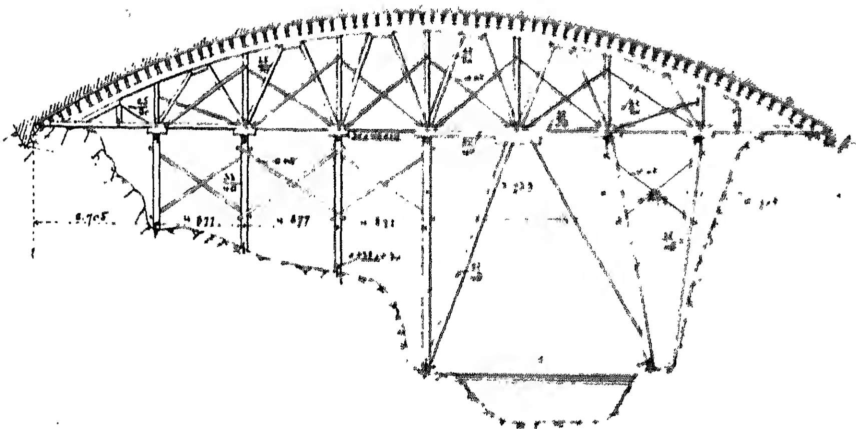
f₃ — Coupe en travers aux retombées — 3mm



f₅ — Détail du cintre — 2mm



f₄ — Cintre de l'arche sur la rivière — 2mm5



2. Pourquoi on a fait un pont en maçonnerie. — Il remplace un pont en bois à deux travées : on a adopté des arches en maçonnerie, comme les plus vite faites et les moins chères.

3. Couronnement. — La plinthe est en deux assises en porte-à-faux de 15^cm chacune.

Il n'y a pas de garde-corps.

4. Cintres. — *A. - Partie au-dessus des naissances.* — Elle est la même pour les deux cintres.

Les montants et contrefiches sont en sapin de 25^cm × 30^cm.

Les assemblages tiennent par des broches : les pièces n'en sont pas entaillées.

Les vaux V (f_1) sont formés de 4 cours de planches de 7^cm6 × 25^cm4, clouées l'une sur l'autre en découpe.

Les couchis *c*, de 20^cm × 20^cm, portent sur des coins en chêne W de 15^cm de largeur et 45^cm7 de longueur. Il y a une paire de coins par couchis et par ferme, soit 72 par ferme, 432 par voûte.

Au décintrement, il a été très difficile de décoller ces coins, probablement parce qu'ils étaient en bois vert non raboté.

Les couchis portent un platelage *p* de 7^cm6 (f_3).

Pour tenir compte des bosses des voussoirs en douelle, on a ménagé entre le platelage et la douelle théorique, un jeu *e* de 7^cm6 (S_4). On a posé les voussoirs sur des liteaux taillés en V, puis bourré le vide de fil de caret [2].

B. - Partie au-dessous des naissances. — Les montants sont en pin dur de 35^cm × 40^cm.

A cause de la violence du courant, on a dû retrousser sur 11^m58 le cintre de l'arche en rivière : il porte sur deux montants inclinés s'appuyant sur une semelle posée sur une plate-forme en béton étalée sur le rocher.

Les autres montants du cintre en rivière, et tout l'étage inférieur de l'autre, s'appuient directement sur le rocher préalablement nivelé.

Des goujons de 30^cm de long, 38^mm de diamètre, pénètrent par moitié dans le rocher, par moitié dans les montants.

La charge sur les poteaux du milieu est d'environ 30 tonnes.

5. Exécution des voûtes. — Les joints des libages, de 13^mm à l'intrados et 51^mm à l'extrados, ont été matés [3] au mortier de ciment Portland, avec des spatules [4] en fer, de 13^mm d'épaisseur et 76^mm de largeur.

La voûte Est, cubant 458^m³7, a été construite en 4 jours.

2. « *rope yarn* ».

3. « *tamped* ».

4. « *straps* ».

6. Quantités.

Voûtes et socles	$964^{mc}8$
Plinthes	$218^{mc}6$
Tympans et remplissage	1886^{mc}
Béton en fondation (cintre)	$137^{mc}6$
	$3207^{mc}0$

7. Dates. — Les travaux ont commencé le 12 septembre 1899. Les trains ont passé sur le pont le 10 décembre 1899, soit 90 jours après.

8. Personnel.

Projet : M. A. S. Cheever, Ingénieur en chef de la Division de Fitchburg, (Boston and Maine R.R.)

Entrepreneur : M. J. W. Rollins, Jr, Ingénieur de la Maison Holbrook, Cabot et Daly.

SOURCES :

S_1. — Engineering News, 21 juin 1900, p. 402 : « *New double 140 Ft. span stone arch* « *bridge for the Fitchburg R R., at Bellows Falls, Vt.* »

S_2. — Dessins d'exécution et photographies, gracieusement communiqués par M. A. S. Cheever, Member Am. Soc. C. E. « Superintendent Fitchburg Div. », Boston and Maine R. R.

Ce qui n'est pas spécifié S_2 est de S_1.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ [1]

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES

SOUS ROUTE

Série $\hat{A}^{n} r^{te}_{(\geqslant 40^m)}$ [2]

Voir Préliminaires, Tome III, p. 3 et 4 :
1. — pour la définition des arcs « très surbaissés »,
2. — pour le sens de ce symbole.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage* 1	PROJET — ENSEMBLE *Longueur* *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage 2	Largeurs *entre parapets* *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados 3	GRANDES VOÛTES — INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon* 4	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées* 5	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées* 6	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	PRESSIONS en kg (0m01²) *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
de **Putney** *Angleterre* 1882–1883 **A**n rle (≥ 40m)[1] *5 voûtes en arc :* *une centrale de 43m891 à 1/7,46* *2 intermédiaires de 39m319 à 1/7,94* *2 de rive de 34m138 à 1/8,61*	» » »	13m411 *14m325* Léger fruit »	Arc de cercle 43m891 *5m86* 1/7,46 = 0,133 *43m97*	1m372 *1m676* *vers les retombées*		Bandeaux : PT [1] Granit *Ciment Portland*		1° Dalles sur murs longitudinaux de 0m57 espacés de 1m06 et 1m07 2° »
Boucicault *France* 1888–1890 **A**n rle (≥ 40m)[2] *5 voûtes égales de 40m*	*233m94* 0 11m36	8m00 *8m70* Pas de fruit 0m55	Arc de projection de chaînette renflé par rapport à l'arc de cercle de 0m261 à 7/8 de la 1/2 portée à partir de la clef 40m00 *5m00* 1/8 = 0,125 *53m90* *26m07*	1m05 *1m238*	1m05 *1m238*	Bandeaux : PT [1] [illegible] Douelle et Queutage : MAV [1] [illegible] Calcaire de [illegible] ([illegible] en moyenne) *Ciment artificiel, Vicat [illegible]*	Pression moyenne à la clef [illegible] *Courbe de pression passant par [illegible] des points de clef et de retombée*	1° Pas d'évidements 2° *Médaillons dans les tympans au dessus des piles*
de **Mehring** *Allemagne* 1903–1904 **A**n rle (≥ 40m)[3] *4 voûtes égales de 46m*	*237m* » 12m70	6m50 *6m30* » »	Arc d'anse de panier à 3 centres 46m00 *6m17* 1/7,455 = 0,134 *60m* *31m95*	1m00 *1m30*	1m00 *1m30*	Béton 1, 3, 5	Pression [illegible] 21k3 31k5 18k6 [illegible] Roues [illegible] de 18t	1° 8 voûtes transversales vides, en plein cintre, de 2m00, sur piles de 0m70 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

SÉRIE $\bar{A}^{n}$ r[te] (> 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé* 10	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement 11	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement* 12	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux 13	par mq de douelle [2] 14	MODE DE CONSTRUCTION 15	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date 16	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v 17	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER **Q** DÉPENSE **D** Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4] 18
Argile dure " " Piles : *Caissons métalliques havés* Culées : *Épuisements dans des batardeaux*	Arche centrale Retroussé sur 16m76 *Tôle* Coins On a construit 5 cintres.	9 " 1m727			Voussoirs sur bandes de plomb de 5mm, larges de 5cm, placées suivant le rayon.			D 6453680f Prix d'adjudication
Sable argileux fin affouillable Piles : *Béton immergé dans un caisson sans fond échoué sur pilots en coches* Pression maxima : sur le béton 6k7 sur le sol (bande de pieux) 3k3 Culées : *Pieux coiffés de 1m20 de béton*	Arche rive droite : Retroussé sur 10m60 (mariniers) Autres arches : Fixes Poteaux, poinçons, tringles Vérins On a construit 5 cintres.	6 *25m* 1m60	Cintre marinier. 326mc 5558k 17342f Cintre courant. 273mc 2885k 13165f	 0mc89 15k17 47f34 0mc75 7k88 35f93	A pleine épaisseur. 6 tronçons, 7 clavages.	Arche rive droite (n° 1) (décintrée prématurément) Autres arches : Tympans montés au niveau des extrados. Voûte n° 2 — *229 j.* 3 — *207 j.* 4 — *185 j.* 5 n 6 — *67 j.* 5 juin	t'_v 44mm « anormal » t'_v / t''_v 8mm / 23mm 13 / 31 6 / 22 11 / 40	| | Fondations | Élévation | Ensemble | | D | 128000f | 358000f [6] | 486000f | | D : S_p | 68f4 | 191f3 | 259f7 | | D : W | 5f6 | 15f7 | 21f3 | 6. Dont 10000f pour les bornes et médaillons.
Rocher " " *A chaque pile, 2 caissons havés.*	Aux 2 arches du milieu, passe marinière de 11m20 Coins	6 *20m* 1m18 *100mm*	A chaque cintre marinier. Pieux 28mc 1 étage inférieur 52mc 1 étage supérieur 80mc Platelage 14mc 183mc Pour les 4 cintres. 900mc 10000k	 0mc62	Tranches symétriques.	Voûtes nues *RG* *19 j.* *46 j.* *57 j.* *RD* *63 j.*	t_r 70mm (cintre marinier) t'_v 8mm 30 10 15	| | Fondations | Élévation | Ensemble | | D | 75274f | 186643f | 261917f | | D : S_p | 48f8 | 121f2 | 170f | | D : W | 3f8 | 9f4 | 13f2 |

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 1). C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDES VOÛTES					
	Longueur *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg 0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
d' **Orléans** *France* 1904-1906 Ân rte (⩾ 40m)4 *7 voûtes égales*	353m42 10mm 4m (parabole) RG 48m RI 13m41	13m45 *13m80* Pas de fruit 0m906	Arc de projection de chaînette renflé par rapport à l'arc de cercle de 0m13 à 72 % de la 1/2 portée à partir de la clef. 43m85 *5m80* $\frac{1}{7,56}$ = 0,132 *48m827*	1m25 *1m58*	1m25 *1m58*	Bandeaux : PT [1] Douelle : MAV [1] Calcaire de Massangis (Yonne) 710k Queutage : MAV [1] Calcaire d'Ancy le Franc, de Larrys clair, de Chassignelles (Yonne), etc. Parties vues de l'extrados : Calcaire de Massangis (Yonne), Senozan (Saône et Loire), Saint-Florent (Cher), Comblanchien (Côte d'Or) 600 à 1100 *Ciment lent Candlot 600k*	Pression max. moy. *sans surcharge* Clef 26k8 18k9 Retombées 33k9 18k9 *avec surcharge* [illegible] Clef 29k1 20k5 Retombées 36k8 20k5 [illegible] Clef 29k6 19k7 Retombées 30k5 19k6 [illegible] 0k3 *Arc élastique* 300k mq	1° 8 voûtes transversales vues, en arc de cercle de 2m80 à 1/6,51, sur piles de 0m65, percées de 4 voûtes en plein cintre, de 1m60 2° *Arcs bordés*
de **Krappitz** *Allemagne* 1905 Ân rte (⩾ 40m)5 *Une voûte de 50m ; entre 2 voûtes en arc, de 25m à 1/5,55*	» » 9m (lit)	» » 0m40	Arc d'anse de panier à 3 centres 50m00 *6m00* $\frac{1}{8,33}$ = 0,12 *64m10* *11m90*	1m20 *2m00*	1m20 *2m00*	Voûte en petits moellons, Aux têtes, encadrement de grandes pierres de taille *Ciment 0m333*		1° 12 voûtes transversales vues, en plein cintre, de 1m, sur piles de 1m 2°
de **Gross-Kunzendorf** *Allemagne* Ân rte (⩾ 40m)6 *Une voûte de 40m entre 2 voûtes en arc, de 20m à 1/5,55*	*100m80* » 7m (étiage)	8m30 *7m20* » 0m45	40m00 *4m20* $\frac{1}{9,523}$ = 0,105	0m90 *1m35*	0m90 *1m35*	Comme au Pont de Krappitz Ân rte 40m 5		1° Pas d'évidements 2°

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, n° 6.

SÉRIE A[n] P[te] (> 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé*	EXECUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES: Type *Matière* Appareils de décintrement	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement*	Cube de bois, Poids de fer, Dépenses: Totaux	par mq de douelle ²	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_o au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p ³ { de volume « utile » W ⁴.
10	11	12	13	14	15	16	17	18
Marne 4m7 à 18m6 Pression maxima : Culées 17k3 Piles 9k4 *Air comprimé*	Aux 2 arches RD : Retroussé sur 9m (mariniers) Aux 5 autres arches : Fixe Montants et contrefiches *Sapin* Boîte à sable	9 25cm 1m70 "	Moyenne des 7 cintres (Pieux compris) 370mc 9637k 25413f	 0mc58 15k2 40f1	A pleine épaisseur 10 tronçons 11 clavages	Voûtes unes Arches nos 1 (un) . 73 j.. ; 2 . . . . . . 63 j.. ; 3 . . . . . . 51 j.. *29-31 mai* Arches nos 4 et 5, décintrées partiellement avec 1, 2, 3, complètement avec 6 et 7 Arches nos 6 . . . . . . 68 j.. ; 7 (un). . 62 j.. *21-25 juillet*	t_r (en *mm*) Clef / Reins Cintres courants: 20 à 29 / 25 à 38.5 Cintres mariniers: 38 à 50 / 14 à 29.5 t'_v (en *mm*) (moyenne des 3 têtes) Arche 1: 8mm ; 2: 6mm6 ; 3: 8mm3 Arche 6: 5mm ; 7: 7mm4	(see table below)
"								
"								
"								
Béton armé de vis, sur pilotis								
Argile ferme								
"								
"								
Béton armé de vis, sur pilotis								

	Fondations	Élévation	Ensemble
Q	14355mc	18816mc	33171mc
Q : S_p	2mc 90	3mc 90	6mc 95
Q : W	0mc 25	0mc 32	0mc 57
D	922462f	1369472f	2291934f
D : S_p	194f1	288f1	482f2
D : W	15f8	23f4	39f2
D : Q	64f3	72f8	69f1

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 9). C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET — ENSEMBLE *Longueur entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	ENSEMBLE Largeurs *entre parapets* / *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	GRANDES VOÛTES INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1m³ de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en kg (0m01)² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Schweich** *Allemagne* 1905-1906 $\hat{A}^n$ r[te] (⩾ 40m)7 *15 voûtes en arc : 3 de 46m, 3 de 10m (RD), 9 de 10 à 15m (RG).*	*309m15* 0 au-dessus des voûtes de 46m 15m (lit)	7m 00 *6m 60* Pas de fruit 0m30	Arc d'anse de panier à 3 centres **46m,00** *6m 17* $\frac{1}{7,455}$ 0,134 *60m 00* *31m 95*	**1m,00** *1m 30*		Béton Ciment 1v Sable de la Moselle 2v5 Gravier de la Moselle 5v	Pression avec surcharge : max. moy. Clef 33k8 21k1 Retombées 32k8 19k3 400k mq et Rouleau à vapeur de 24t	1° 10 voûtes transversales vides, en plein cintre, de 2m, en béton armé, sur piles de 0m70 à 1m30 2° »
d' **Avignon** *France* 1905-1909 $\hat{A}^n$ r[te] (⩾ 40m)8 *10 voûtes de 40m.*	*465m* Dos d'âne Déclivités maxima : 6mm3 (RD) 13mm (RG) 12m87 (étiage)	10m,00 *8m 20* Pas de fruit 0m64	Arc de projection de chaînette renflé par rapport à l'arc de cercle de 0m264 à 70 0/0 de la 1/2 portée à partir de la clef **40m,00** *5m 00* $\frac{1}{8}$ = 0,125 *53m 90* *26m 07*	**1m,05** *1m,237*	1m,05 *1m 237*	Bandeaux : PT[1] Joints de [illegible] Douelle et Queulage : MAV[1] Joints de [illegible] Calcaire de Ruoms *Ciment maritime Pavin de Lafarge 600k* *Mortier fait à la main*	Pression maxima Clef 31k5 Retombées 37k2 *Arc élastique*	1° Pas d'évidements Remplissage en gravier. 2° »
de **Trittenheim** *Allemagne* 1907-1908 $\hat{A}^n$ r[te] (⩾ 40m)9 *4 voûtes en arc : 3 de 46m, 1 de 30m à 1/6,711.*	*208m* 30mm 10mm 19m (lit)	6m,50 *6m 10* Pas de fruit 0m35	Arc d'anse de panier à 3 centres **46m,00** *6m 17* $\frac{1}{7,455}$ = 0,134 *56m 00* *33m 55*	**1m,00** *1m 30*		Béton Ciment 1v Sable de la Moselle 2v5 Gravier de la Moselle 5v	Pression avec surcharge max. moy. Clef [illegible] 22k5 Retombées 20k2 21k6 500k mq et Rouleau à vapeur de 24t	1° 10 voûtes transversales vides, en plein cintre, de 2m, en béton armé. 2° »

1 — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, page II, n° 6.

SÉRIE A^n 1de (· 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE (*Suite*)

EXÉCUTION — FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg 0m01² *Procédé* 10	GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de decintrement 11	Nombre *Épaisseur* Écartement d'axe en axe *Surhaussement* 12	Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux 13	par m² de douelle [2] 14	MODE DE CONSTRUCTION 15	DÉCINTREMENT État d'avancement du pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date 16	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v 17	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4] 18
Rocher » Pression maxima 8k6 »	Arche centrale : Retroussé sur 16m (marinier) Autres arches : Fixes » Coins	7 *20 m* 1^m06 *100mm*	Cintre marinier : Pans 37m³ Étage inf 46m³ Étage sup 160m³ Platelage 16m³ 259m³	$0^{m³}87$	A pleine épaisseur Tranches de 1^m50 de largeur		t_c 90mm (arche centrale) t'_v 20mm environ	Q 6963m³ Q : S_p $3^{m³}05$ Q : W $0^{m³}29$ Fondations / Élévation / Ensemble D — 80019f / 228481f / 308500f D : S_p — 35f4 / 100f1 / 135f2 D : W — 3f4 / 9f6 / 13f0 D : Q — » / » / 44f3
Culée RG et Piles 1 et 5 *Marne* -13m10 à -15m01 Piles 2, 3, 4 *Gravier* -13m87 à -16m34 Piles 6 à 9 et Culée RD *Rocher calcaire* -14m03 à -6m Pression maxima 12k3 *Air comprimé*	Fixes » Boîtes à sable	6 *30 m* 1^m50	Moyenne des 5 cintres : 239m³ 16574k 16808f	$0^{m³}69$ 48k 48f7	A pleine épaisseur 9 clavages.	Voûtes nues N° — *Temps sur cintre* — Date du décint 1 (RG) — *129j* — 20-II 2 — *113* — 20-III 3 — *100* — 16-IV 4 — *90* — 15-V 5 — *91* — 23-VI 6 — *86* — 23-VII 7 — *81* — 26-VIII 8 — *68* — 8-IX 9 — *57* — 29-IX 10 (RD) — *76* — 18-XI	t_c min : 6mm (Vte 10) MAX : 100mm (Vte 1) t'_v moyenne des 2 têtes 9mm 7mm7 6 2 6 3 8 6 14 8 14 8 16 8 17 6	Q 24304m³ Q : S_p $53^{m³}2$ Q : W $0^{m³}48$ Fondations / Élévation / Ensemble D — 663661f / 1019423f / 1683084f D : S_p — 146f5 / 219f2 / 365f7 D : W — 13f0 / 20f2 / 33f2 D : Q — » / » / 68f9
Rocher » Pression 4k5 »	Arche centrale : Retroussé sur 16m (marinier) Autres arches : Fixes	6 *20 m* 1^m17 *100mm*			A pleine épaisseur Tranches de 1^m50 de largeur		t'_v 12mm à 15mm	Q 4920m³ Q : S_p $3^{m³}63$ Q : W $0^{m³}27$ Fondations / Élévation / Ensemble D — 69789f / 214031f / 283820f D : S_p — 51f6 / 158f3 / 209f9 D : W — 3f8 / 11f6 / 15f4 D : Q — » / » / 57f7

2 Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 9). C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDES VOÛTES					1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
	Longueur *entre abouts des parapets* Déclivités Hauteur maxima de la chaussée au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la chaussée sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayon*	ÉPAISSEURS — CORPS Clef *Retombées*	ÉPAISSEURS — TÊTES Clef *Retombées*	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en $kg/\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
de **Longuich** *Allemagne* 1909-1911 A^n r^{te} $(\geqslant 40^m)$10 *4 voûtes en arc : une de 46m, 2 de 43m, une de 34m.*	*248m* Dos d'âne Déclivité maxima : 60mm 13m20	4m 60 *4m 10* Pas de fruit 0m35	*Voûte de 46m* Arc de cercle $46^m,00$ *6^m 17* $\frac{1}{7,455} = 0,134$ *45^m 95*	*Voûte de 46m* $1^m,05$ *1^m 20*	*Voûte de 46m* $1^m,05$ *1^m 20*	Béton Ciment.......... 1v Sable naturel et gravier........ 8v	» *Courbes de pression avec points de passage arbitrairement choisis*	1° Piliers en béton armé de $40^{cm} \times 40^{cm}$, portant une plate-forme armée.
			Voûtes de 43m Arc de cercle $43^m,00$ *5^m 34* $\frac{1}{8,052} = 0,124$ *45^m 95*	*Voûtes de 43m* $0^m,95$ *$1^m,10$*	*Voûtes de 43m* $0^m,95$ *1^m 10*		500k/mq et Rouleau à vapeur de 24T	2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

SÉRIE A^n 1re (· 40m)

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

FONDATIONS *Nature du sol* Profondeur sous l'étiage Pressions sur le sol en kg (0m01)² *Procédé*	EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES Type *Matière* Appareils de décintrement	 Nombre *Épaisseur* *Écartement d'axe en axe* *Surhaussement*	 Cube de bois Poids de fer Dépenses Totaux	 par mq de douelle[2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT État d'avancement du Pont *Temps entre le dernier clavage et le décintrement* Date	TASSEMENTS DE LA CLEF sur cintre t_c au décintrement t'_v après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q DÉPENSE D Totaux et par unité { de surface utile S_p[3] { de volume « utile » W[4].
10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Voûte de 46m							
Rocher	Retroussé sur 20°	5 *20cm* 0m98	Bois 150mc Poutre métallique 20t Boulons Crampons 3t	0mc76	A pleine épaisseur.	Plate forme construite	*Voûte de 46m* t_c 40mm	Q 3 230mc Q : S_p 2mc83 Q : W 0mc31
»	Poutre métallique sur la passe marinière				Tranches isolées.			
	Coins	*1.40mm*	Metal 23t	116k		»	t'_v 20mm	
»	*Voûtes de 13m*							
Épuisements dans des batardeaux	Fixe Montants et contrefiches » Coins	5 *20cm* 0m98 *1.20mm*	Bois 150mc Boulons Crampons 3t	0mc82 16k		15 septembre		

	Fondations	Élévation	Ensemble
Q	60466f	128336f	188802f
D : S_p	53f1	112f4	165f5
D : W	5f9	12f5	18f4
D : Q	»	»	58f7

2. Pour le calcul de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 6). C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets. Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\overline{A}^{n}$ 1te ($\geqslant$ 40m)

MONOGRAPHIES

PONT DE PUTNEY[1] SUR LA TAMISE (*ANGLETERRE*)

1882-1883 — $\overline{A}^{n}$ 1te ($\geqslant$ 40m) 1

Φ_1 (S_4)



1. Quelques dispositions. — Les tympans (parements en granit et corps en briques) sont élégis par 7 murs longitudinaux en briques, portant une file de dalles, puis une plate-forme continue de dalles (S_4) (f_4, f_5).

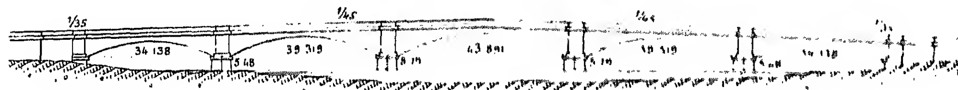
Sous chaque trottoir passent 3 tuyaux en fonte : deux de 0m61, un de 0m30.

La haute mer noye les piles jusqu'au chaperon (S_4)[2].

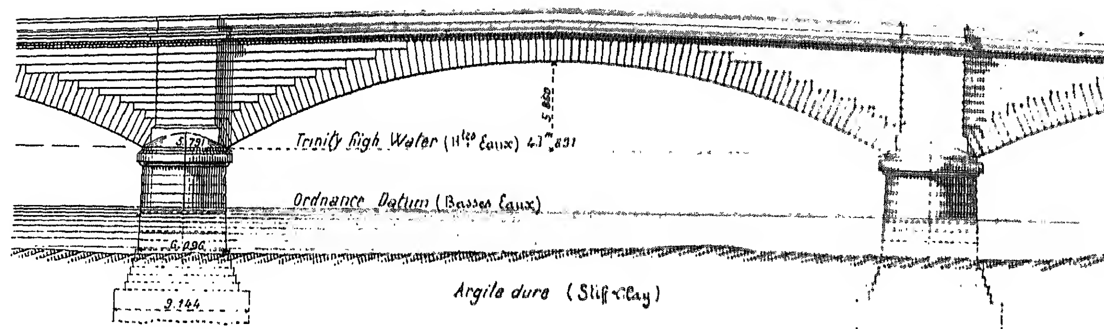
1. — Il relie Fulham (rive gauche) à Putney (rive droite), en amont et près de Londres.

2. — Voir la photographie du pont à marée haute (S_2, p. 626).

f_1 — Ensemble — 0mm5

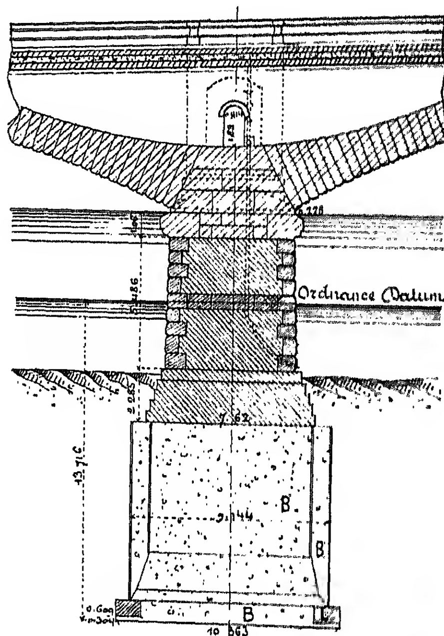


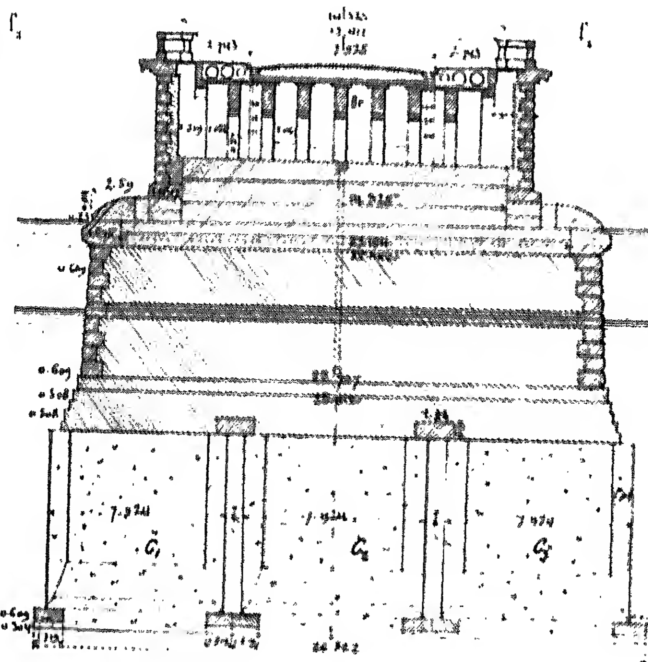
f_2 — Arche centrale — 2mm



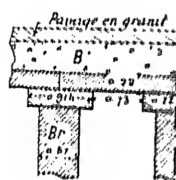
Coupes d'une pile de l'arche centrale — 3mm

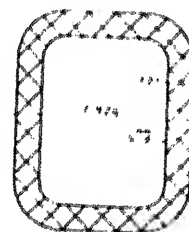
en travers — en long





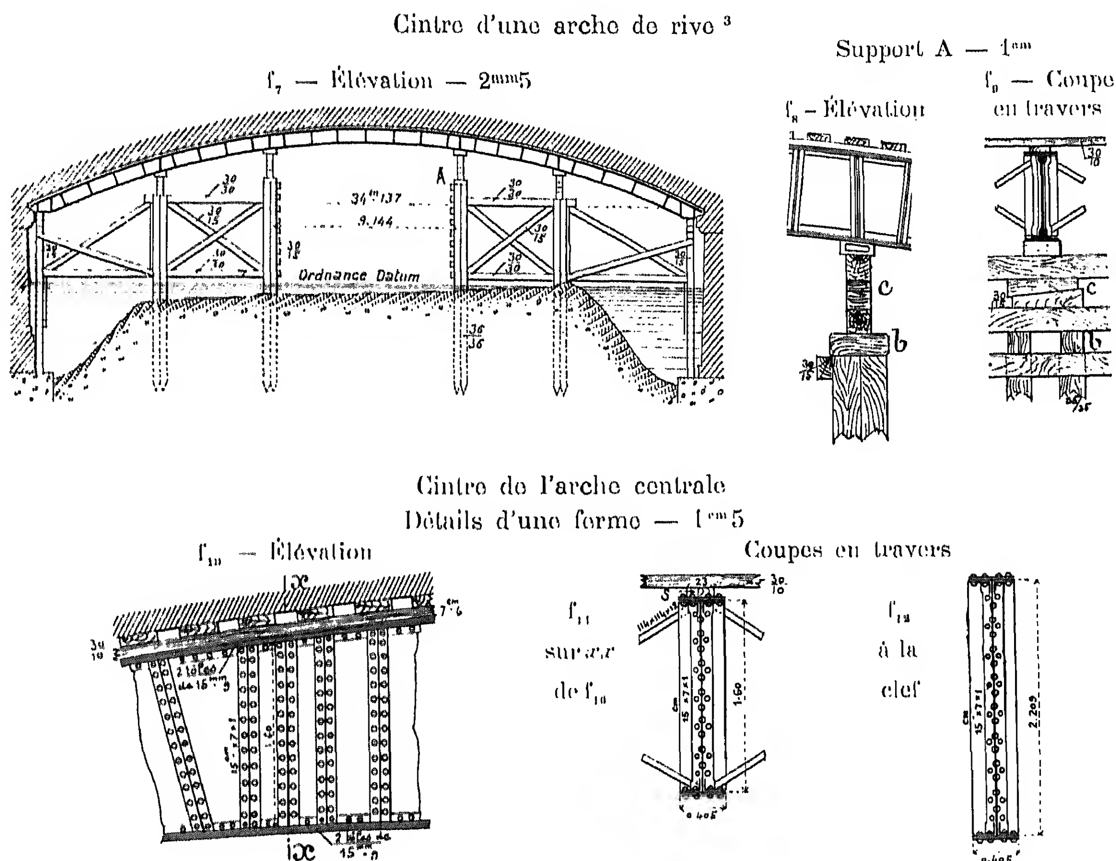
f_5 — Dalles sous chaussée 1cm





f_6 — Plan d'un caisson C (f_4) 3mm

2. Cintres (f_7 à f_{12}). — Les fermes en tôle portent sur pieux de $36^{cm}/36^{cm}$ par des billots *b*, puis par des coins *c* (f_8, f_9), qui ont servi à mettre les fermes de niveau, puis à décintrer (S_1, S_2).



Cintre d'une arche de rive [3]

f_7 — Élévation — $2^{mm}5$

Support A — 1^{cm}

f_8 - Élévation

f_9 — Coupe en travers

Cintre de l'arche centrale
Détails d'une ferme — $1^{cm}5$

f_{10} — Élévation

Coupes en travers

f_{11} sur *xx* de f_{10}

f_{12} à la clef

Le cintre de l'arche centrale laissait une passe libre de $16^{m}76$ de largeur avec $3^{m}66$ de revanche au-dessus de la haute mer (S_4).

Aux autres arches, la passe avait $9^{m}14$ de largeur, $3^{m}35$ de revanche (S_2).

La semelle supérieure de chaque ferme portait une fourrure en bois *s* (f_{11}), sur laquelle on cloua un platelage non jointif (f_{10}, f_{11}).

On a chargé lourdement les cintres, pour prévenir leur tassement sous le poids des voûtes (S_4).

3. Fondations. — *A. - Piles.* — Les piles et culées sont fondées dans l'argile dure [4] (S_2). Chaque pile (f_4) repose sur trois caissons rectangulaires en fer C_1, C_2, C_3, à deux parois, dont l'intervalle a été rempli de béton au fur et à mesure de la descente (S_1).

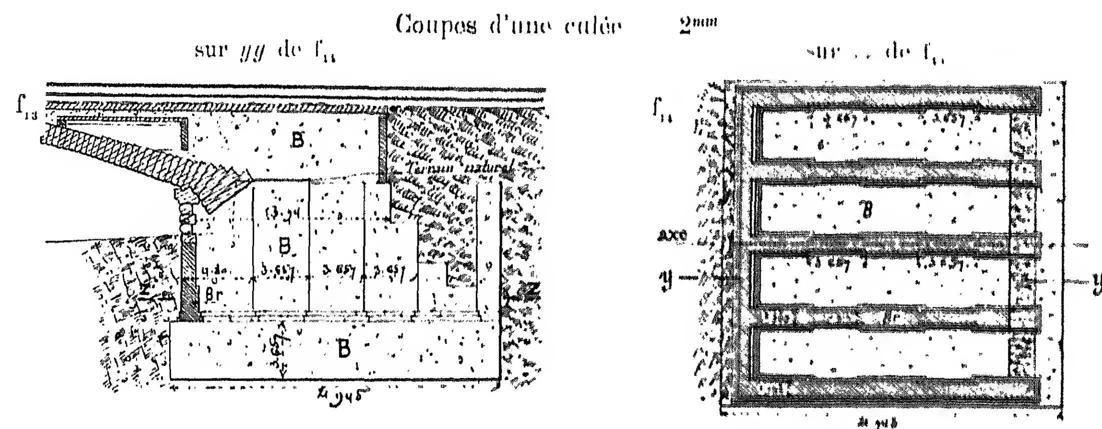
3. — S_1 ne donne pas le dessin d'ensemble du cintre de l'arche centrale, seulement celui d'une arche de rive, mais spécifie qu'ils sont, pour les 5 arches, du même type.

4. — «*Stiff clay*».

On descendit ces caissons dans l'argile, en les guidant par des files de pieux. On déblaya à l'intérieur, puis, sur 0m91 de profondeur au-dessous des couteaux et 0m61 de largeur en dehors. Au fond, on étala d'abord une couche de béton de 0m30, et, sur ce béton et sous les couteaux, une file de libages de 0m61 d'épaisseur (S_2).

On remplit ensuite de béton l'intérieur des caissons, par couches de 0m30 (S_1), et on recouvrit l'intervalle de 0m91 qui les sépare, de dalles de 1m83 × 0m91 × 0m91 (S_2).

B. - Culées. — Les culées sont fondées dans des batardeaux à deux enceintes de pieux et palplanches (S_3).



Leurs murs sont en briques avec parements en granit ; le noyau est en béton dans des cloisons de briques (S_1, S_3). Tout est à mortier de ciment (S_3).

4. Exécution des voûtes.

— Les voussoirs avaient au moins 1m22 de longueur suivant les génératrices de douelle, avec découpe de 46cm (S_1) : on les posait sur deux bandes de plomb de 5mm d'épaisseur et 5cm de largeur, disposées suivant toute la hauteur du joint, à 15cm des arêtes (S_1).

Lorsqu'une assise était posée, on remplissait les joints de mortier de ciment de Portland (S_1).

5. Personnel.

Ingénieurs { *Projet :* Sir J. W. Bazalgette.
Exécution : M. Edw. Bazalgette (S_1).

Entrepreneur : M. John Waddell, d'Edimbourg.

SOURCES :

S_1. — Engineering, 23 juillet 1886, p. 85 et 86, « *Bridge over the Thames at Putney* : « *Details of centering* ».

S_2. — Engineering, 17 mai 1895, p. 624 à 626 : « *Thames Bridges — Putney Road* « *Bridge* ».

Ce qui n'est pas spécifié S_2 est de S_1.

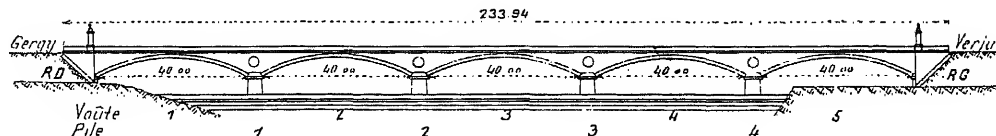
S_3. — Ce que j'ai vu — juin 1903.

PONT BOUCICAUT[1] SUR LA SAÔNE, A VERJUX[2] *(SAÔNE-ET-LOIRE)*

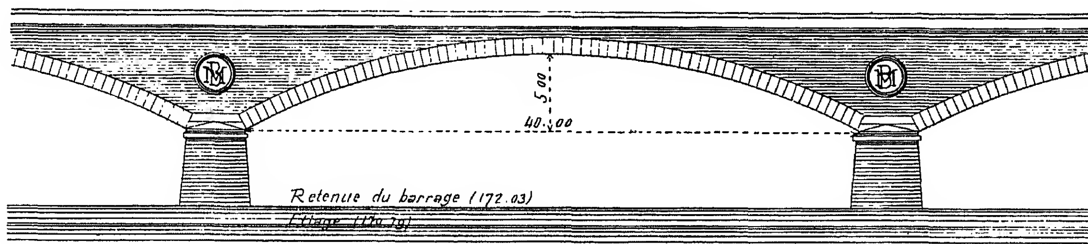
Chemin d'intérêt commun

1888-1890 — $\overset{\frown}{A}^n$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)2

$\int_1$ — Ensemble, aval — $0^{mm}5$



$\int_2$ — Une arche — 2^{mm}



1. Tracé de l'intrados. — L'intrados est défini par l'équation :

$$y = \frac{b}{2r}\left[\omega^{\frac{x}{a}} + \omega^{-\frac{x}{a}} - 2\right]^{3}$$

dans laquelle

a (1/2 portée) $= 20^m$
b (montée) $= 5^m$
$r = 2{,}484138$ [4]
$\omega = 6{,}821685$ [4]

On vérifie que l'intrados peut s'écrire ainsi :

$$y = 1{,}006486\left[e^{\frac{x}{10{,}41608}} + e^{-\frac{x}{10{,}41608}} - 2\right]$$

1. — Construit aux frais de Mme Marguerite Boucicaut, propriétaire des Magasins du Bon Marché, née à Verjux.

2. — entre Gergy et Verjux, à 16^{km} en amont de Chalon-sur-Saône.

3. — C'est une projection de chaînette.
Soient en effet :

$$\omega^{\frac{x}{a}} = e^{\frac{x}{m}} \quad \text{et} \quad \frac{b}{2r} = K \times \frac{m}{2}$$

l'équation devient :

$$y = K\frac{m}{2}\left[e^{\frac{x}{m}} + e^{-\frac{x}{m}} - 2\right] = KY'$$

Y' étant une chaînette de paramètre m.
Gauthey a profilé en chaînette le cerveau des voûtes, ou au moins de l'une des 5 voûtes du pont de Navilly sur le Doubs (1782-1790).
Cet emploi de la chaînette, ensuite abandonné et perdu, a été retrouvé et repris un siècle après, à 18^{km} environ de Navilly, par un arrière-successeur de Gauthey. (Annales des Ponts et Chaussées, 1904, 3e trimestre : M. de Dartein : « *La vie et les travaux d'Emiland Gauthey* », p. 115 et 116).

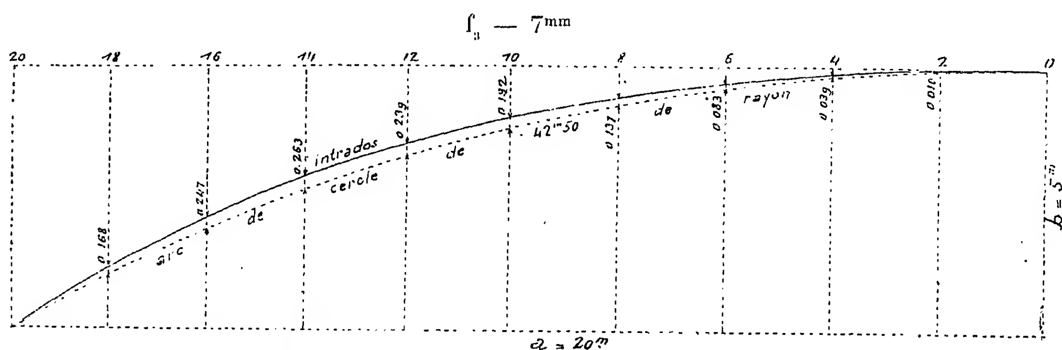
4. — On trouvera plus loin, dans ce Tome III, Livre II, comment ont été déterminés r et ω.

La chaînette proprement dite, – courbe d'un fil pesant, – de mêmes termes en e est :

$$Y = \frac{10,41608}{2}\left[e^{\frac{x}{10,41608}} + e^{-\frac{x}{10,41608}} - 2\right]$$

Ses ordonnées sont contractées dans le rapport $\frac{5,20804}{1,006486}$.

2. Renflement de l'intrados par rapport à l'arc de cercle de même portée et même montée.



Abscisses comptées à partir du sommet de l'arc............	2^{m}	4^{m}	6^{m}	8^{m}	10^{m}	12^{m}	14^{m}	16^{m}	18^{m}	20^{m}
Ordonnées de l'arc de cercle de même portée et même montée.	0,047	0,189	0,426	0,760	1,193	1,729	2,372	3,127	4,000	5,000
Ordonnées de l'intrados.......	0,037	0,150	0,343	0,623	1,001	1,490	2,109	2,880	3,832	5,000
Différences (renflement).......	0,010	0,039	0,083	0,137	0,192	0,239	0,263	0,247	0,168	0,000

L'écart maximum est de $0^{m}263$ à 14^{m} de la clef (70/100 de la demi-portée).

L'arc de cercle a $42^{m}50$ de rayon. L'intrados adopté a un rayon de $53^{m}90$ à la clef, de $26^{m}07$ aux naissances : il retombe moins durement sur les piles.

3. Extrados. — « *L'arc d'extrados a ses ordonnées, par rapport à* « *l'horizontale tangente au sommet, proportionnelles à celles de l'arc d'intrados,* « *et dans le rapport* (S_1) :

$$\frac{y'}{y} = 0,919668$$

4. Pourquoi on a adopté des voûtes en projection de chaînette. — M. Tourtay [5] les justifie ainsi [6] :

« *1° On peut y tracer une courbe de pression qui passe à très peu près par les* « *milieux de tous les joints.....*

5. — La méthode de M. Tourtay est exposée plus loin dans ce Tome III, Livre II.

6. — Exposition, Paris, 1900. — Notices, Travaux Publics, p. 27 et 28.

« 2° *Cette courbe de pression moyenne ne sera pas, en général, réalisée avec les*
« *procédés habituels de clavage et de décintrement; mais les autres courbes de pression*
« *qu'on peut tracer, par exemple celle qui passe par le tiers supérieur du joint de clef et*
« *par le tiers inférieur du joint de naissance, restent... dans la région moyenne de*
« *la voûte. Dans la voûte en arc de cercle, au contraire, la courbe de pression se*
« *rapproche plus ou moins de l'extrados vers les reins...*

Φ_1 (S_3)

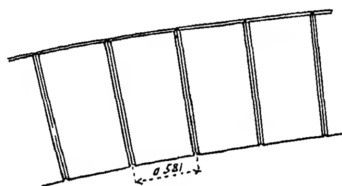


5. Pourquoi on a réduit l'épaisseur de la voûte. — « *L'épaisseur*
« *des voûtes... (1ᵐ05 à la clef, 1ᵐ24 aux naissances) est sensiblement plus faible que*
« *celle adoptée pour les grandes arches de dimensions comparables... Dans les*
« *grandes arches surbaissées, on ne réduit pas sensiblement les pressions en*
« *augmentant l'épaisseur au-delà d'une certaine limite...*

« *Ainsi la pression moyenne calculée à la clef, qui est de 19ᵏ 9 par centimètre*
« *carré avec l'épaisseur de 1ᵐ05 adoptée, serait de 17ᵏ 3 avec une épaisseur ac 1ᵐ50*
« *et de 15ᵏ 8 avec une épaisseur de 2ᵐ* ».

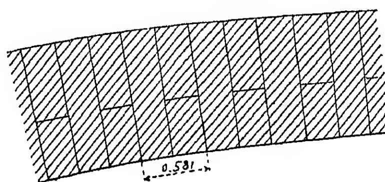
6. Appareil des voûtes.

f_4 — Bandeau



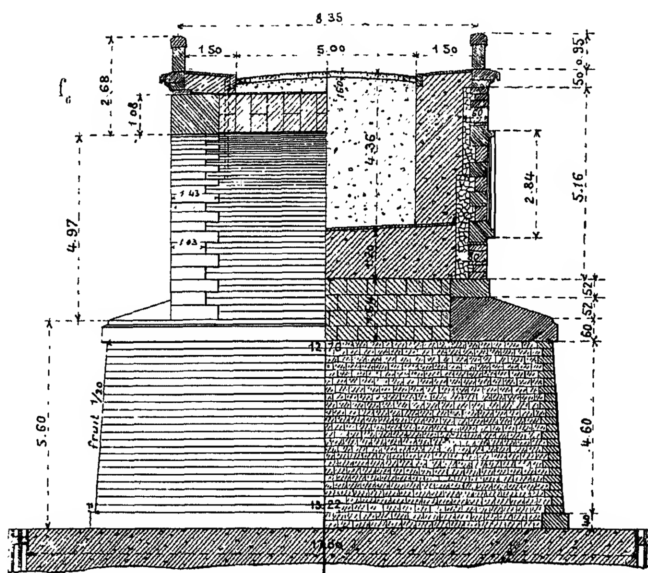
1ᶜᵐ5

f_5 — Corps



Demi-coupes en travers — 5mm

à la clef d'une voûte | sur l'axe d'une pile



7. Tympans.

— Pour une hauteur maxima de plus de 5m, ils ont seulement 0m80 à la base, 0m60 au sommet (f_6). Ils sont doublés par un mur en béton maigre (100k de chaux hydraulique pour 1mc de gravier).

L'intervalle entre les tympans est rempli de gravier : il n'est pas élégi.

Au projet de M. Tourtay, on a ajouté : dans les tympans, des médaillons portant le monogramme M. B, — ils sont petits et plats ; — aux extrémités, de maigres obélisques (S_3).

8. Couronnement.

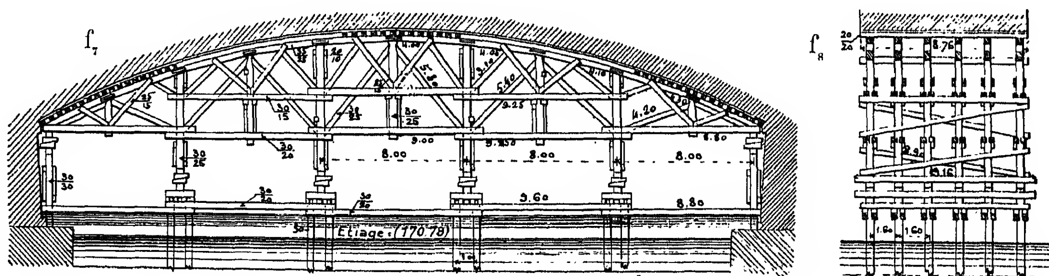
— Le parapet en pierre de taille semble un peu lourd.

Comme à d'autres ponts en arcs très surbaissés, on y observe (mai et septembre 1909) des bosses sur les piles, des creux aux clefs des voûtes.

On regrette que ce grand pont n'ait pas un léger dos d'âne.

9. Cintres.

Cintre courant — 2mm5



La voûte extrême rive droite avait un cintre marinier, avec passe de 10m60 (f_8).

Pour satisfaire le Service de la Navigation, on dut plus tard agrandir cette passe, sous la voûte fermée (S_2).

f_8 - Cintre marinier. - Agrandissement de la passe - 5mm

Au dessin f_9, on a indiqué par des lignes ponctuées les pièces supprimées, par des hachures les pièces ajoutées A B, A' B', qu'on a serrées par les coins *cc'*.

Cette opération n'a provoqué aucun tassement (S_2).

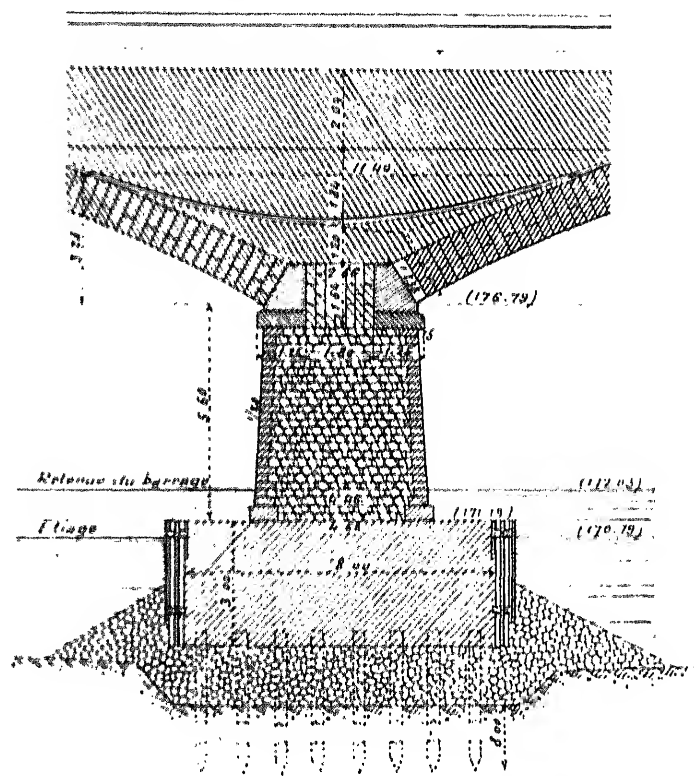
La voûte tassa plus tard de 44mm au décintrement.

10. Fondations. - *A. Piles.*

A l'emplacement de chaque massif, on a dragué, puis battu 136 pieux en sapin de 0m35, au mouton à vapeur Lacour de 1200k, tombant de 1m en moyenne, c'est-à-dire avec mouton lourd et petite chute [7].

On arrêtait le battage, soit quand la fiche sous le fond dragué atteignait 8m, soit quand le refus était de 4mm seulement par volée de 10 coups avec 1m de chute.

f_{10} Coupe en long d'une pile - 5mm



On a ensuite immergé entre les pieux des enrochements (f_{10}) sur une hauteur de 2m à la pile 1, 1m50 à la pile 2, 1m à la pile 3. Il n'y en a pas sous la pile 4.

Les pieux furent recépés à 0m50 au-dessus des enrochements ; puis on échoua sur eux un caisson sans fond de 17m de long, 8m de large, 4m20 de hauteur, dont le bordage était calfaté à sa partie supérieure sur 0m60.

Dedans, on immergea du béton par couches d'au moins 40cm, au moyen d'un tube en planches à débit continu [8], de 0m40 de côté.

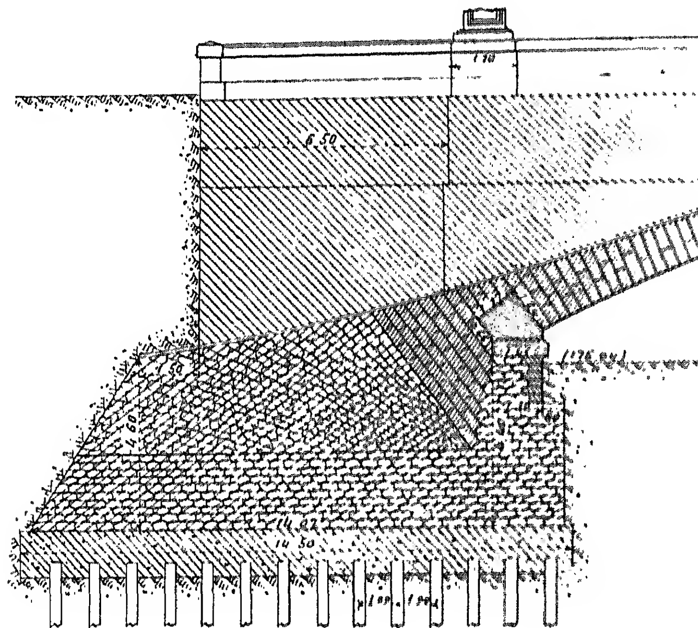
7 Sur 1179 pieux, on n'en a cassé que 2. Dans un battage d'essai, on en avait cassé 3 sur 7 avec un mouton de 1400k tombant de 5m20.

8 Annales des Ponts et Chaussées, 1885, I, p. 776 à 780 : « *Note sur un procédé simple pour couler le béton sous l'eau* », M. H. Heude, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

On coula à chaque pile 400^{mc} de béton (70^{mc} à 80^{mc} par jour).

B. Culées.

f_{11} — Coupe en long d'une culée — 5^{mm}



11. Exécution des voûtes. — Elles ont été construites à pleine épaisseur en 6 tronçons menés de front : aux naissances, sur coffrages ; plus haut, sur taquets au sommet des poteaux du cintre.

On clava à partir de la clef.

Au moment où on allait claver la voûte 2 (f_1), les têtes des palées supportant le cintre, qui n'avaient peut-être pas été battues bien verticalement, se déplacèrent dans le sens longitudinal, de la pile 1 vers la pile 2, sous les fermes qui, au-dessus des coins, n'avaient pas bougé. Le déplacement atteignit 11^{mm} à la ferme aval.

On étrésillonna les palées entre elles et sur les piles.

Au cintre de la voûte 4, l'ensemble des pieux commençant à se déplacer transversalement, on battit, à quelques mètres de chaque palée en mouvement, un pieu vers la base duquel on appuya une contrefiche coincée à la partie supérieure de la palée.

12. Décintrement. — On dégageait, au moyen de deux vérins, chaque paire de coins en chêne supportant les montants verticaux ; 1/6 de tour de vérin produisait un abaissement de 2^{mm} (48 vérins par voûte).

A. Voûte I *(sur cintre marinier).* — Pour satisfaire le Service de la Navigation, alors que les voûtes 1 et 2 étaient seules chargées, les 3 autres étant fermées

sur cintre, mais non chargées, on décintra la voûte 1. Elle n'était pas assez contre-butée et tassa de 44mm, « *abaissement... anormal* » (S_1).

Quelques voussoirs de tête, aux naissances, furent légèrement épaufrés à l'intrados.

B. *Voûtes* 2 *à* 5. — « *Les 4 autres voûtes ont été décintrées ultérieurement* « *ensemble,... le pont... complètement chargé jusqu'au niveau de l'extrados...*

« *On a d'abord desserré les coins aux voûtes nos 2, 3, 4 et 5, en y portant successivement les verrins ; on a alors décintré la voûte no 5 complètement, au moyen* « *des verrins. Pour les autres voûtes nos 2, 3 et 4, les coins étaient suffisamment* « *desserrés pour qu'on pût, en les frappant à petits coups sans attendre qu'ils se* « *resserrassent, mener simultanément ou à très peu près, le décintrement des trois* « *voûtes* (S_1).

13. Mouvements observés.

	Piles N° 1	Voûtes N° 2	Piles N° 2	Voûtes N° 3	Piles N° 3	Voûtes N° 4	Piles N° 4	Voûtes N° 5	Culée R 0
Date du dernier clavage		19 oct. 1889		10 nov. 1889		2 déc. 1889		30 mars 1890	
Nombre de jours sur cintre		229 j		207 j		185 j		67 j	
Tassements en mm — au décintrement (5 juin 1890) *Tympans montés au niveau des extrados.* — totaux (des clefs des voûtes) T_0		**13**mm [10]		**18**mm		**11**mm		**14**mm	
— partiels : Piles seules : t_p^0	**5** mm		**5** mm		**5** mm		**5** mm		**0**
— partiels : Voûtes seules : $t_v^0 = T_0 - \frac{t_p^0 + t_{p+1}^0}{2}$		8		13		6		11	
augmentation de tassement, du décintrement (5 juin 1890), au 11 octobre 1890. *Ouvrage livré à la circulation le 21 août 1890.* — totaux (des clefs des voûtes) ΔT		20		22		20		31	
— partiels : Piles seules : Δt_p	**5**		**5**		**3**		**4**		**0**
— partiels : Voûtes seules : $\Delta t_v = \Delta T - \frac{\Delta t_p + \Delta t_{p+1}}{2}$		15		18		16		29	
le 11 octobre 1890. — totaux (des clefs des voûtes) $T = T_0 + \Delta T$		**33**		**40**		**31**		**45**	
— partiels : Piles seules : $t_p = t_p^0 + \Delta t_p$	10		10		8		9		0
— partiels : Voûtes seules : $t_v = t_v^0 + \Delta t_v = T - \frac{t_p + t_{p+1}}{2}$		23		31		22		40	

9. — S_1, Note additionnelle, p. 477, 478. — Dans sa note : « *Détermination des pressions réelles dans* « *les voûtes surbaissées en forme de chaînette* » (Annales des Ponts et Chaussées, 1888. — 1, p. 565 à 636), M. Bartay trouvait un tassement de 16mm ou 27mm avec un coefficient d'élasticité de 1×10^9 ou $0,6 \times 10^9$

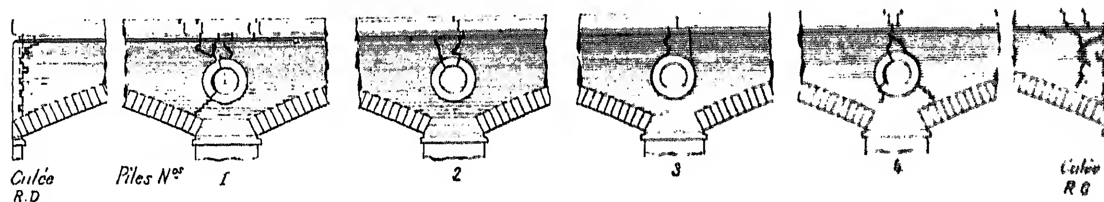
10. — Les chiffres gras sont les tassements mesurés.

A partir du 11 octobre 1890, les voûtes tassèrent encore de 6 à 8^{mm}, probablement sous l'influence de la température. Le 13 mai 1891, elles étaient revenues à la position du 11 octobre 1890 [11].

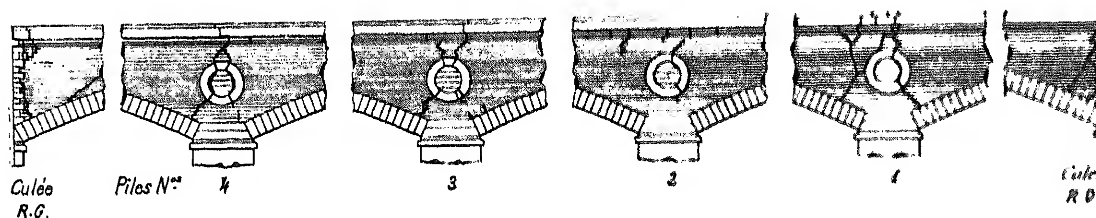
En mai 1909, on observait dans les tympans, au droit des piles, de minces fissures [12] (f_{12}, f_{13}) comme dans presque tous les ponts en arc très surbaissé.

Fissures dans les tympans

f_{12} — Tête aval — 2^{mm}



f_{13} — Tête amont — 2^{mm}



Aucune de ces fentes ne se continue dans les voûtes.

Voici les mouvements au-dessus des clefs et des appuis, entre le 28 mai et le 14 décembre 1909 [12] : (abaissements ↓, relèvements ↑)

f_{14}

RD. — RG.

Voûte N°		1		2		3		4		5	
Pile N°			1		2		3		4		
Mouvem^ts^ en m.m. amont	↓2	↓2	0	↓8	↓3	↑1	↓1	↓1	↓2	↓9	↓2
Mouvem^ts^ en m.m. aval	↓3	↓7	↑2	↓3	↑1	↑9	0	↓3	↓4	↓9	↓2

14. Personnel.

Ingénieurs :

Projet : M. Tourtay, Ingénieur des Ponts et Chaussées ;

Exécution : M. Jozon, Ingénieur en chef ;

M. Tourtay, Ingénieur ordinaire.

Entrepreneur : M. Bruno.

11. — S_1. Note additionnelle, p. 477.

12. — Observations de M. Bouteloup, Ingénieur des Ponts et Chaussées, à Chalon sur Saône

SOURCES :

S_1. Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1892, p. 445 à 497, Pl. 29 : « *Notice sur la* « *construction du Pont Boucicaut* », M. Tourtay.

S_2. — Renseignements qu'a bien voulu me communiquer M. Tourtay.

S_3. Ce que j'ai vu   mai 1909.

Tout ce qui n'est pas spécifié d'une autre source est de S_1.

PONT SUR LA MOSELLE, A MEHRING *(ALLEMAGNE, - Prusse-Rhénane)*

Route du village à la station [1]

1903–1904 $\hat{\mathbf{A}}^{n} r^{le} (\geqslant 40^{m})^{3}$

Φ_1 — amont (S_2)



1. Matériaux. — Sauf les parements des avant-becs, qui sont en granit, tout est en béton, même les trottoirs et leurs bordures.

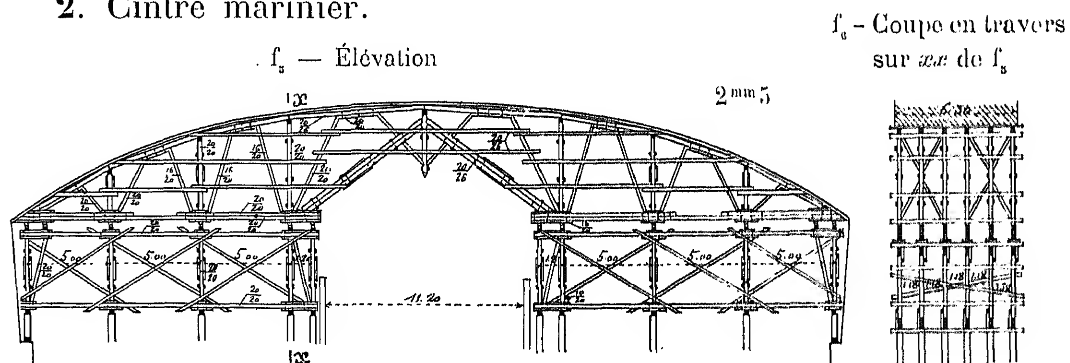
Sur les arrière-becs, on a dessiné des assises.

Pour l'aspect, on peut critiquer les dièdres de béton des retombées (r de f_2).

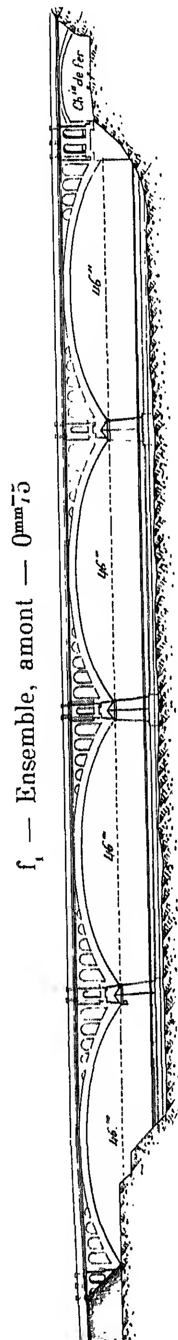
2. Cintre marinier.

f_5 — Élévation

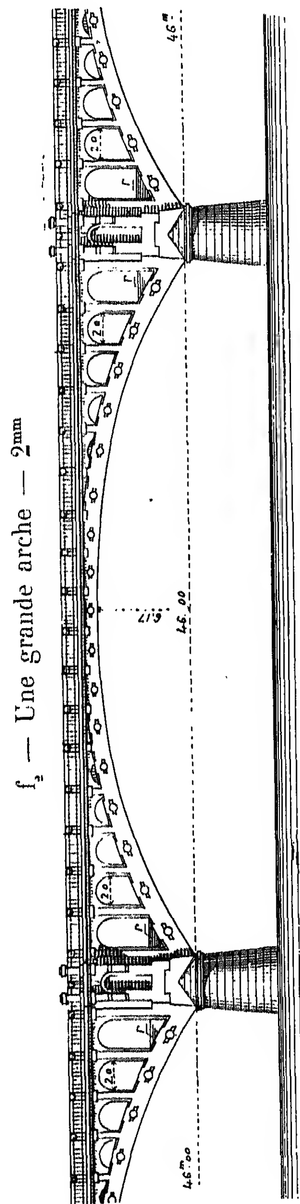
f_6 - Coupe en travers sur xx de f_5



1. — Chemin de fer d'intérêt local de Trèves à Bullay (Moseltalbahn), à 17k4 de Trèves. — Le pont est à 100m en amont de la station.

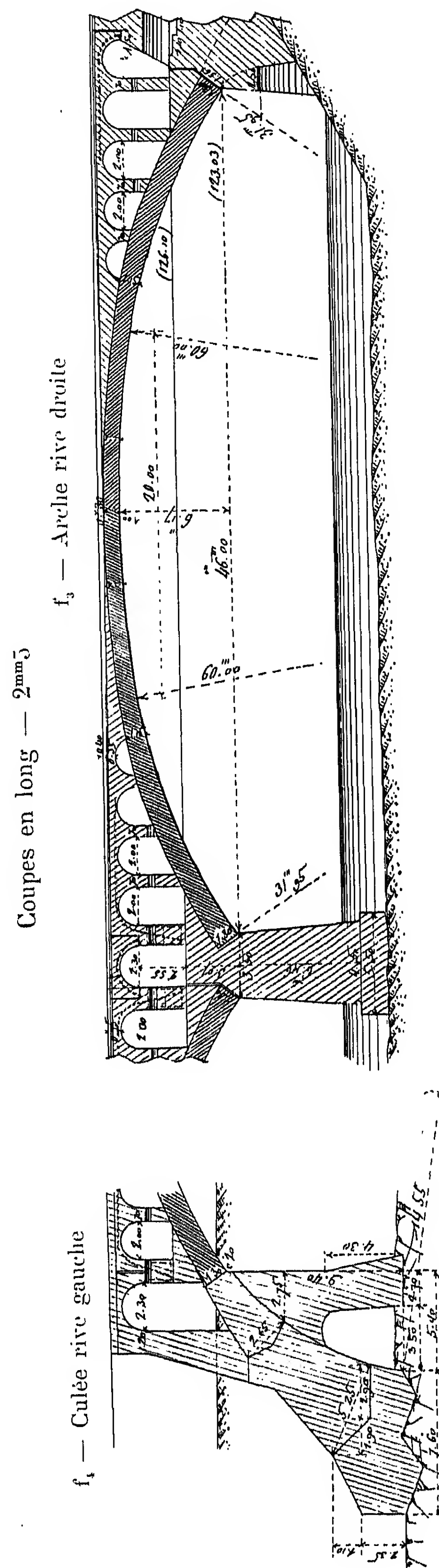


f1 — Ensemble, amont — 0mm75



f2 — Une grande arche — 2mm

Coupes en long — 2mm5



f3 — Arche rive droite

f4 — Culée rive gauche

3. Dates.

Commencement des travaux	1er novembre 1903	
Achèvement des piles	1er juillet 1904	
Grandes voûtes (de la rive droite à la rive gauche)	1er-6	août 1904
	7 - 12	
	18 - 23	
	13 - 20	
Décintrement	8 octobre 1904	
Ouverture à la circulation	1er janvier 1905	

4. Personnel. — *Projet et Entreprise :* MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.

Direction des Travaux : M. Treplin, « Baurat » à Trèves.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et renseignements (S''_1), gracieusement communiqués par M. B. Liebold, en octobre 1910.

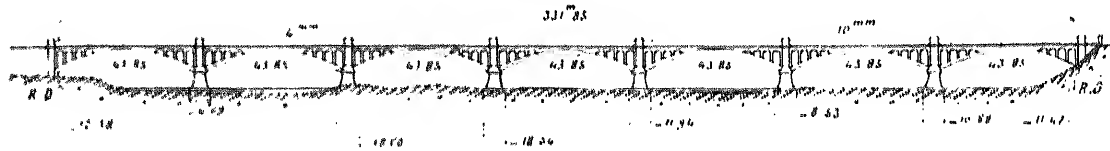
S_2. — Ce que j'ai vu — septembre 1910.

PONT SUR LA LOIRE, A ORLÉANS[1] (LOIRET)

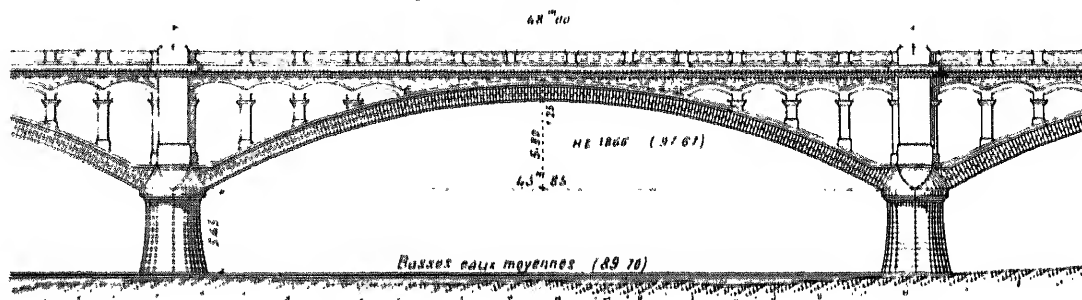
Route nationale n° 152 de Briare à Angers

1904-1906 — A^n r^{10} (> 40m)4

f_1 — Ensemble, aval — 0mm4



f_2 — Une arche — 2mm



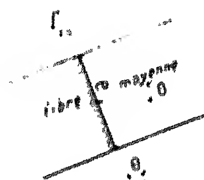
1. Déclivités. — A partir du milieu du pont, la chaussée est en pente de 10mm vers la première voûte rive gauche, de 4mm vers la culée rive droite ; ces deux pentes sont raccordées par une parabole de 48m de corde (S_1, S_4).

Les 7 arches ont la même portée et la même montée (S_1).

Les naissances de deux arches voisines sont à des niveaux différents : les piles ont des hauteurs inégales (S_1).

2. Intrados. — Par rapport à l'arc de cercle de même portée et de même montée, l'intrados est cambré suivant une projection de chaînette[2], comme l'indique ce tableau (S'_1) :

Abscisses à partir du sommet		11m836	13m803	15m766	17m726	19m682
Ordonnées	de l'arc de cercle	1,609	2,203	2,898	3,697	4,608
	de l'intrados	1,505	2,082	2,771	3,582	4,527
Différences		*0m104*	*0m121*	*0m127*	*0m115*	*0m081*



3. Épaisseur de la voûte. — L'épaisseur e de la voûte au point où la fibre moyenne est inclinée de θ sur l'horizon (f_{15}) est $\frac{e_0}{\cos.\ \theta}$.

La pression moyenne par unité est ainsi à peu près constante dans la voûte[3].

1. au droit du Boulevard des Princes.

2. appelée « caténoïde » par l'auteur du projet (Annales des Ponts et Chaussées, 1900, - 4e trimestre - « Mémoire sur le tracé et le calcul des voûtes en maçonnerie », M. Legay).

3. - Voir plus loin, Tome III, Livre II.

f_3 — Coupe en long sur l'axe — 3^mm

f_5 Demi-coupes en travers — 3^mm sur xx de f_3 à la clef f_6

f_4 — Coupe en long de la culée rive gauche — 3^mm

Pile — 5^mm

f_7 — Élévation

f_8 — Demi-plan par-dessus

f_9 — Coupe horizontale zz de f_7

Chaperon — 2^cm f_{10}

Cordon des petites piles — 3^cm f_{11}

Archivoltes f_{12} des grandes voûtes 3^cm

f_{13} des voûtes d'évidement 5^cm

f_{14} - Couronnement - 3^cm

4. Piles. — Comme au pont de Charrey [4], les becs sont en ogives persanes, et les retombées des voûtes s'appuient sur le couronnement, qui est en saillie de 0m20 (f_{10}).

Par suite, l'ouverture réelle de chaque arche est : 43m85 + 2 × 0m20 = 44m25 [5].

L'épaisseur des piles se réduit à : 4m15 – 2 × 0m20 = 3m75 (f_7).

Les chaperons sont imités du pont de Homps sur l'Aude (1781-1788) [6] (S_2).

Φ1 aval (S''_1)



5. Tympans. Couronnement. Aspect. — La corniche est empruntée aux pilastres du pont de Navilly sur le Doubs (1782-1790) [7] (S_3).

Les tympans sont en briques ; elles y font bon effet.

Sur ce pont léger, le parapet plein, avec ses dés en pierre de taille, paraît un peu lourd.

4. Annales des Ponts et Chaussées, 1893, 2e semestre, p. 737 et suivantes : « *Notice sur le grand pont en maçonnerie construit sur la Saône à Charrey* », M. Mocquery, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées (5 arcs de 30m au 1/8).

5. Aux culées, le couronnement n'est pas en saillie : l'ouverture des arches de rive est 43m85 + 0m20 = 44m05.

6. M. de Dartein, Études sur les Ponts en pierre remarquables par leur décoration. Ponts français du XVIIIe siècle, volume III – Languedoc. Paris, Béranger, 1908, p. 173 à 184, Pl. 41 à 44. « *Le Pont de Homps sur l'Aude* ».

7. Id., vol. IV, [illegible] Bourgogne, p. 173 à 189, Pl. 23 à 30. « *Le Pont de Navilly sur le Doubs* ».

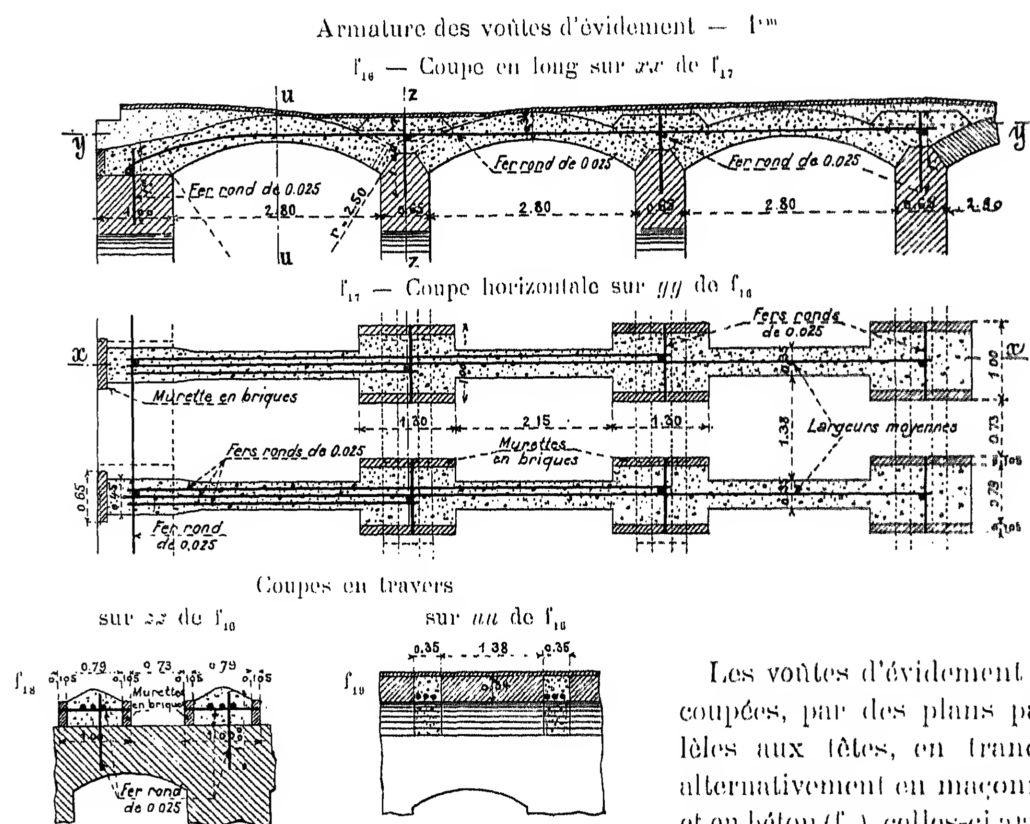
Il y a, à 660^{m} en amont, un fort beau pont du XVIIIe siècle [8], vigoureux, robuste, solide.

Très sagement, on a traité le nouveau de façon tout opposée : ce pont léger, presque trop, à lignes fines, presque menues, fait un heureux contraste avec la lourde masse du vieux pont.

6. Dispositions pour permettre, sans fissures, les mouvements des tympans dus aux variations de température. — En s'abaissant par le froid, les grandes voûtes entraînent avec elles leurs tympans, d'où fissure inévitable au-dessus de la pile, point fixe.

Il fallait donc l'accepter, la cacher, et, en même temps, contre-buter la poussée de la dernière voûte d'évidement.

Voici le très judicieux dispositif adopté (S_4) :



Armature des voûtes d'évidement — 1re

f_{16} — Coupe en long sur xx de f_{17}

f_{17} — Coupe horizontale sur yy de f_{16}

Coupes en travers

sur zz de f_{16} (f_{18}) — sur uu de f_{16} (f_{19})

Les voûtes d'évidement sont coupées, par des plans parallèles aux têtes, en tranches, alternativement en maçonnerie et en béton (f_{19}), celles-ci armées de fers longitudinaux qui absorbent la poussée de la dernière voûte (f_{16} à f_{19}).

Entre la demi-pile du viaduc d'évidement et le pilastre, est ménagé, jusqu'au parapet, un vide masqué en élévation par le pilastre qui, lui, est fixe comme la pile (f_9).

C'est le premier grand ouvrage français en maçonnerie où l'on ait assuré le jeu de la dilatation.

8. — 1751-1760. — 9 arches en anse de panier à 3 centres. Arche centrale de 100 pieds (32m48) d'ouverture, 28 pieds (9m10) de montée ; arches de rive de 92 pieds (29m89) d'ouverture, 25 pieds (8m12) de montée. — Largeur entre têtes : 46 pieds (14m94). — Longueur entre culées : 166 toises, 4 pieds (324m84). Projet de Hupeau, adjugé le 29 mars 1751. — On a mis 4 ans à le fonder, 4 ans à faire les voûtes, 2 ans à l'achever. — Livré au public fin 1760. — Fondé, après épuisements dans des batardeaux, sur pilotis et grillage. Les fondations ont été fort difficiles. — On en lira la description avec intérêt et profit.

Perronet. *Description des Projets et de la Construction des Ponts de Neuilly, de Mantes, d'Orléans et autres*, » Tome second, Paris, Imprimerie Royale, MDCCLXXXIII, « *Pont d'Orléans* », p. 1 à 24, Pl. XXXI à XXXIX.

7. Pressions par $\overline{0^{m}01}^{2}$ (S'_1).

A. – Dans les voûtes :

			à l'intrados	sur la fibre moyenne	à l'extrados
Sous la charge permanente seule		Clef	$11^{k}04$	$18^{k}90$	$26^{k}76$
		Retombées	$33^{k}92$	$18^{k}90$	$3^{k}88$
Sous une surcharge de $500^{k}/_{mq}$, couvrant	toute la voûte	Clef	$11^{k}99$	$20^{k}53$	$29^{k}07$
		Retombées	$36^{k}84$	$20^{k}53$	$4^{k}21$
	les 4/5 de la 1/2 portée à partir de l'appui (Position la plus défavorable)	Clef	$9^{k}80$	$19^{k}71$	$29^{k}62$
		Retombées [9]	$39^{k}46$	$19^{k}57$	- $0^{k}32$ tension

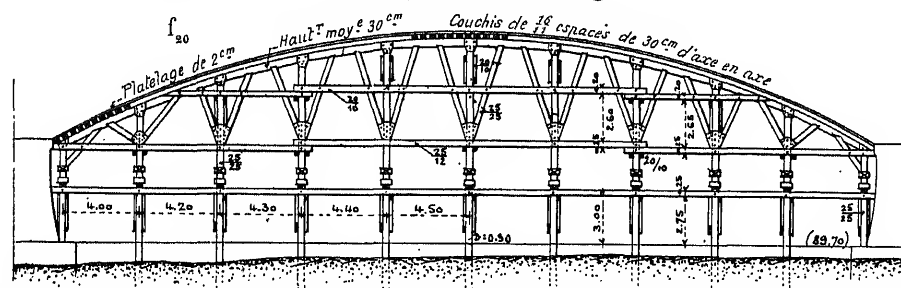
B. – Dans la 2e pile rive droite (où les fondations sont les plus profondes).	sous le couronnement	à la base de la pile	sur le sol de fondation — Pression calculée sur 1^{m} de largeur	sur le sol de fondation — Pression calculée sur toute la largeur
Sous la charge permanente	$8^{k}87$	$7^{k}96$	$10^{k}44$	$9^{k}01$
Sous une surcharge de $500^{k}/_{mq}$ couvrant les 2 demi-voûtes	$9^{k}51$	$8^{k}48$	$10^{k}83$	$9^{k}40$

C. – Sur le sol de fondation, sous la culée rive gauche (sans tenir compte de la poussée des terres).	moyenne	maxima
Sous une surcharge de $411^{k}/_{mq}$ couvrant la voûte rive gauche	$8^{k}64$	$17^{k}28$

8. Cintres.

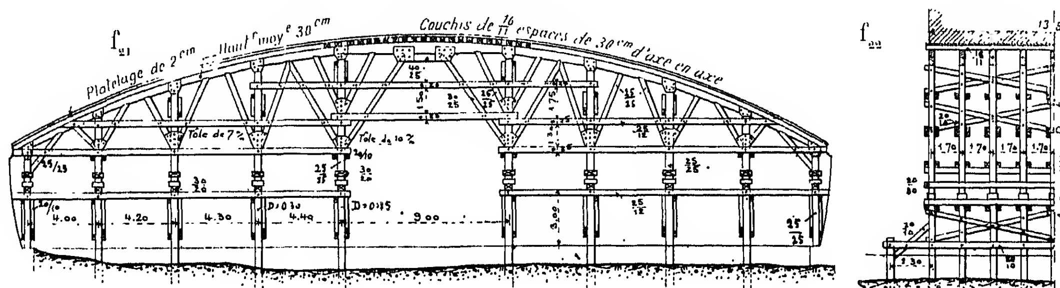
— Pour les 5 arches à partir de la rive gauche, on adopta le type des cintres du pont de Tolbiac à Paris (1879-1882) [10] (S_2).

Cintre des 5 arches à partir de la rive gauche — $2^{mm}5$



Sous les cintres des deux voûtes extrêmes de rive droite, on ménagea une passe libre de 9^{m}, pour faciliter le passage des glaçons (S_2)

Cintres des deux arches de rive droite — $2^{mm}5$



9. — Avec l'épaisseur à la clef portée de $1^{m}25$ à $1^{m}40$, ces trois efforts étaient : $38^{k}08$, $18^{k}38$, $-1^{k}32$. On diminuait donc très peu la compression, et il y avait plus de tension. — Avec l'épaisseur réduite à $1^{m}10$, les trois efforts étaient : $41^{k}48$, $21^{k}03$, $0^{k}58$. On avait un peu plus de compression et pas de tension. — Il y aurait eu intérêt à réduire l'épaisseur à $1^{m}10$. On a mis $1^{m}25$ « *moins par prudence que par des considérations d'esthétique* » (S'_1).

10. — 5 ellipses de $29^{m}10$, $32^{m}15$, $35^{m}20$.

A la première arche (rive droite), la fiche des pieux varia de $1^{m}50$ à 3^{m} ; à la deuxième, elle atteignit 10^{m}. Pour les autres, les pieux furent presque tous entés, quelques-uns eurent 3 entures et une fiche de plus de 20^{m}. Pour quelques-uns, on se contenta d'un refus de 5^{mm} (mouton de 700^{k} tombant de $1^{m}50$ à $1^{m}80$). Quand on ne l'obtenait pas, on battait à côté un autre pieu (S_2).

9. Fondations (S_2). — De janvier 1904 à janvier 1905, soit en moins d'un an, les 8 caissons furent descendus à l'air comprimé de $4^{m}69$ à $18^{m}60$ sous l'étiage, sur marne blanche supportant de 15^{k} à 20^{k} par $\overline{0^{m}01}^{2}$.

Pour atteindre la marne, on avait à traverser des couches calcaires avec veines de tuf ou de silex, et quelques cavernes.

A la culée rive droite, on dut abandonner la descente du caisson, à cause de la déformation de ses parois [11]. On refoula l'eau à $0^{m}80$ au-dessous du couteau en forçant la pression, et on battit dans les poches des pieux en sapin de $1^{m}80$ de hauteur, $0^{m}15$ de diamètre, espacés de $0^{m}50$ d'axe en axe; puis on nettoya ces poches, et on les remplit de béton ou de sacs de ciment quand on ne pouvait épuiser.

Le béton étant arasé au niveau de la tête des pieux, on le recouvrit de deux planchers superposés de rails disposés à angle droit, qu'on noya dans du béton de ciment.

10. Exécution des voûtes. — *A. Dates.* — Le devis prescrivait de construire en même temps les 7 voûtes (S_2).

Voici les dates d'exécution (S_8) :

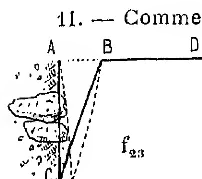
Voûte	1 (rive dr.)	2	3	4	5	6	7 (rive g.)
Commencement....	30 oct. 1905	7 nov. 1905	18 sept. 1905	18 juil. 1905	10 nov. 1905	17 sept. 1905	6 mars 1906
Fin.......	17 mars 1906	27 mars 1906	5 avril 1906	5 mai 1906	7 mai 1906	17 mai 1906	23 mai 1906

B. Joints secs. — Les voûtes furent exécutées avec toute leur épaisseur [12], (3 moellons en général), en 4 attaques.

On ménagea des joints secs au-dessus de tous les poteaux du cintre.

A l'intrados, les moellons à sec de douelle étaient posés, — non sur les lames de plomb prévues, parce que trop difficiles à enlever, — mais sur de petites cales en chêne de $30^{mm} \times 25^{mm}$ de côté, 12^{mm} d'épaisseur, maintenues par des liteaux en sapin de 25^{mm} de hauteur et 8^{mm} d'épaisseur, placés sur le cintre ; à l'extrados, ils étaient tenus par des coins en chêne.

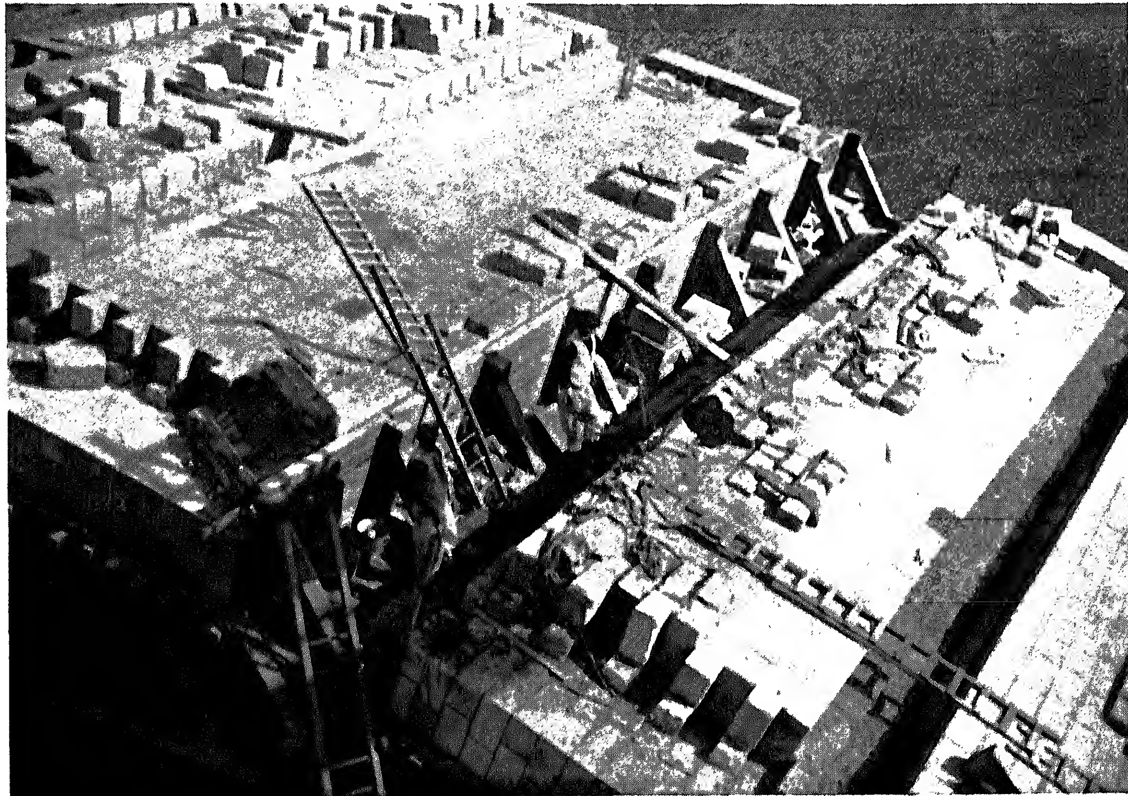
11. — Comme aux ponts Alexandre III, de Passy,... la tôle du plafond DB, au lieu de se continuer en BA, était pliée le long de BC. La crinoline ACB était remplie de béton par en haut avant le fonçage. La paroi AC a rencontré de grosses pierres qui l'ont déformée.



12. — On a craint que la construction par rouleaux n'abaissât la courbe de pression, déjà basse dans ces voûtes très tendues (S''_1).

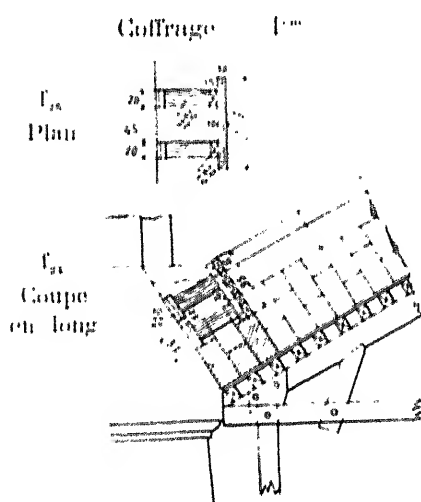
Les tronçons des naissances étaient soutenus à l'extrados par des coffrages, à l'intrados, par 3 moellons dont 2 à sec (f_{21}).

Φ_2 — Exécution d'une voûte (S'_5)

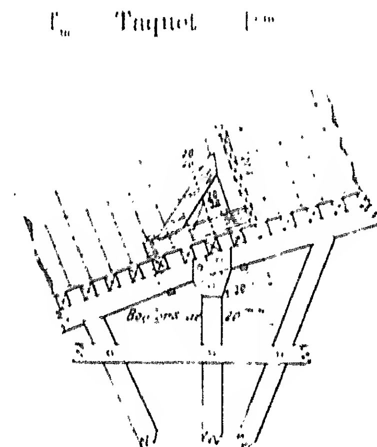


Les tronçons des reins reposaient sur des taquets fixés au-dessus des troisièmes poteaux du cintre à partir des naissances (f_{30}, Φ_2).

Coffrage 1 cm



f_{30} Taquet 1 cm



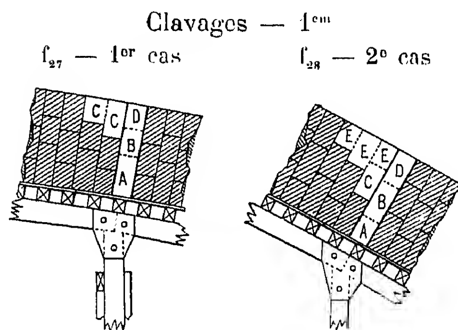
Les joints secs furent remplis de sable aux 5 premières voûtes, — laissés vides aux deux dernières, sauf ceux des naissances : des sacs les garantissaient à l'extrados.

Toutes les assises étaient posées en douelle sur liteaux, pour permettre le rejointoiement.

A la voûte extrême rive droite, une fissure s'ouvrit entre la clef et le premier poteau du cintre, due au fléchissement du vau de la passe.

A la voûte voisine, également sur cintre retroussé, on ménagea là un joint sec.

C. Clavages (S_2). — On clava, à partir de la clef, en matant au refus, par petites épaisseurs, du mortier à 600k à l'état de sable humide. On termina par les naissances, laissées ouvertes jusqu'au dernier moment.



Dans les deux cas indiqués aux croquis f_{27}, f_{28}, A est posé à sec en exécutant la voûte.

1er Cas (f_{27}). — On pose B, on le mate ; puis on pose C et D. On maçonne C à mortier ; 48 heures après, on mate D.

2e cas (f_{28}). — On pose B à sec ; on pose C sur mortier ; 48 heures après on mate B. On pose D à sec ; on maçonne E ; 48 heures après, on mate D.

On a clavé de la rive droite à la rive gauche.

D. Enlèvement des coffrages (S_2). — On enlevait les coffrages sur 3m à chaque tête ; on maçonnait : on matait les joints en partant des têtes.

11. Décintrement (S''_1). — Au moment du premier décintrement, la voûte n° 7 était clavée depuis 6 jours.

On décintra d'abord les trois voûtes rive droite (nos 1, 2, 3), tout en desserrant progressivement les cintres des deux voûtes suivantes (n° 4, de 3mm5, - n° 5, de 2mm), pour ne pas faire fléchir les piles ; puis, deux mois après, on décintra les 4 voûtes rive gauche.

Au premier décintrement, on opéra sur 4 palées seulement à la fois (36 boîtes à sable, 4 équipes de 9 hommes) ; au deuxième, sur 5 palées.

On n'a constaté ni fissure, ni épaufrement. Le tassement et le déplacement des piles ont été insignifiants.

Voici les conditions et les résultats de ces deux décintrements :

		N° des voûtes	Âge moyen des mortiers au début du décintrement	Nombre de jours après le dernier clavage	Décintrement — Séries successives d'abaissement des pistons (Dans les 1res, on abaissait à la fois par descentes de 2mm, dans les dernières par descentes de 1mm, puis plus) — 1re série	2e série	3e série	4e série	5e série	6e sér.	Décollement aux têtes — Abaissement des pistons	Décollement aux têtes — Tassement de la clef	Décollement complet — Abaissement des pistons	Tassement de la clef	Mouvements en mm observés après décintrement — Juin 1906 — 6 h. du matin					
1er Décintrement. Mai 1906	Voûtes complètement décintrées en une fois	1 (1)	171 j	73	2mm	3mm	5mm	12mm	2 à 4mm		5mm	2mm	24 à 28mm	amont 8.7 / aval 7.4	[illegible]	7.4 / 7.[illegible]	7.4 / 8.[illegible]	» / »	7.1 / 7.[illegible]	Jusqu'au 1er juin à la voûte 2, au 27 juin à la voûte 3, on a observé des oscillations diurnes de 1mm à la tête aval exposée à l'ouest. L'oscillation maxima pendant cette période a été de 2 à 3mm.
		2	161 j	63	2	3	5	12	2 à 4		5	2	24 à 28	amont [illegible] / aval [illegible]	[illegible]	[illegible]	7.2 / [illegible]	7.4 / [illegible]	[illegible] / 6.5	
		3	210 j environ	54	2	3	5	16	2 à 4		5	2	28 à 32	amont [illegible] / aval 7.[illegible]	[illegible] / 8.4	12.[illegible] / 11.8	1[illegible] / 13.1	12.7 / 12.4	12.4 / 11.5	
Du 29, à 5 h. 1/2 du matin, au 31, à 3 h. du soir	Voûtes décintrées — Desserrage partiel	4	284 j	24	2	0.5		1 (2)						amont —2.6 / aval —2.4	—2.0 / —2.0	—0.7 / —1.6	—1.0 / —1.0	—1.4 / —1.2	—2.4 / —1.6	
		5	241 j	22 (3)	2									amont —0.8 / aval —0.6	—0.5 / —0.8	—0.6 / —0.6	—1.0 / —1.0	—0.9 / —0.6	—0.2 / —0.6	
2e Décintrement. Juillet 1906	Achèvement en deux fois	4	310 j	80	»	»	3	4	5	»	6.5	2.5	12	amont 4.3 / aval 2.1	Pas de tassement après décintrement. Oscillations diurnes dues à la température. Le 30 juillet, relèvement général de 2mm dû à la chaleur.					
		5	297 j	78		2	3	4	5	2	4	2.5	16	amont 4.7 / aval 4.4						
Du 21, à 5 h. 1/2 du matin, au 25, à 10 h. du matin	Voûtes complètement décintrées en une fois	6	130 j	68	2	2	3	4	5	2	5	2.5	16	amont 5.7 / aval 4.3						
		7 (2)	103 j	62	2	2	3	4	5	4	5	2.5	18	amont 7.6 / aval 7.3						

(1). A partir de la 3e série, on diminuait les abaissements en se rapprochant des naissances. Les chiffres indiqués sont les abaissements au sommet du cintre.
(2). Abaissement opéré pour remédier à un relèvement observé à la suite de la 3e série. — (3). Les nombres précédés de — sont des relèvements.
(4). Abaissement constaté au 2e décintrement, et non différence du relèvement du 1er et de l'abaissement du 2e.

12. Dépenses (S₃).

	Fondations	Élévation	Ensemble
Entreprise	862.505f76	1.244.117f65	2.106.623f41 [17]
Régie	28.124f56	69.721f29	97.845f85
Dépenses générales (surveillants, etc)	17.981f01	26.525f21	44.506f22
Sommes allouées aux Entrepreneurs	13.850f63	29.108f34	42.958f97 [18]
Totaux	922.461f96	1.369.472f49	2.291.934f45 [19, 20, 21]

13. Personnel.

Ingénieurs en chef : M. Renardier.

Ingénieurs ordinaires : M. Levesque – *Choix de l'ouverture.*
M. Legay – *Projet définitif, Etudes de stabilité, Travaux.*

Entrepreneurs : MM. Dedeyn et Perchot (S_3).

17. — Décompte non accepté par les Entrepreneurs.

18. — Non compris les intérêts de 4760f59 que l'Etat doit payer à l'Entreprise.

19. — Non compris les frais d'expertise, dont une partie (2553f) est à la charge de l'Etat.

20. — Les prévisions (abords compris) s'élevaient à 2.430.000f
ainsi réparties :
à la charge de l'Etat, à forfait 1.075.000f
à la charge de la Ville : $\frac{2.430.000^f}{5}$ = ... 486.000f
à la charge du Département, le reste 869.000f
La Ville n'a voulu subventionner qu'un pont en pierre.

21. — Procès-verbal de la réception de l'ancien Pont, par Perronet, 1763 - 17 octobre et jours suivants :

	Livres	Sous
Adjudication du 29 mars 1751	2 084 000	
Augmentation	586 856	13
	2 670 856	13
Façade de la rue Royale d'Orléans	100 000	
Reste pour le pont et ses abords	2 570 856	13

Perronet. *loc. cit. renvoi 8*, p. 15, 16, 17, 18.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution.

S'_1. — Mémoire technique, M. Legay, 5 février 1903.

S''_1. — Note sur le décintrement, M. Legay, 10 septembre 1906.

S_2 — Génie Civil, 29 septembre 1906, p. 337 à 345, Pl. XXII : « *Nouveau pont en maçonnerie sur la Loire à Orléans* » M. A. Dumas.

Renseignements qu'ont bien voulu me donner :

S_3. — M. Renardier.

S_4. — M. Legay.

S_5. — Ce que j'ai vu — juillet 1908.

S'_5. — avril 1906.

S''_5. — juillet 1908.

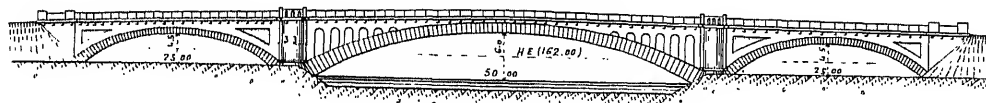
PONT SUR L'HOTZENPLOTZ, A KRAPPITZ

(ALLEMAGNE, – Silésie, – Cercle d'Oppeln)

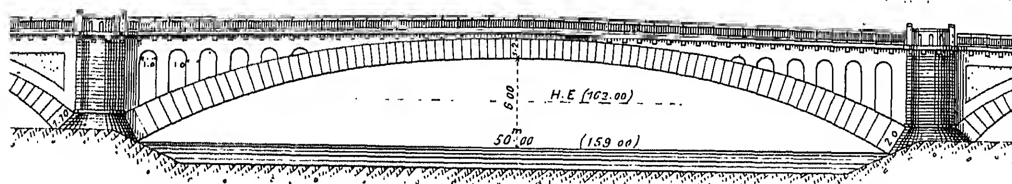
Route de Krappitz à Zywodczütz

1905 — $\hat{A}$n r^{te} (⩾ 40m)5

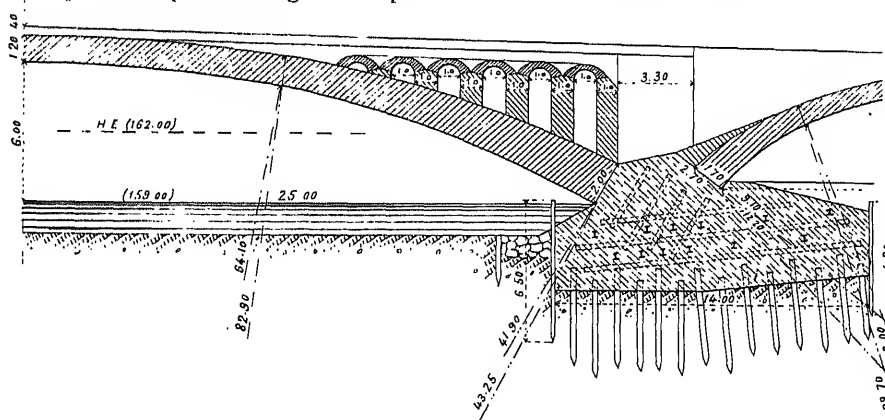
f_1 — Ensemble — 1mm



f_2 — Grande voûte — 2mm



f_3 — Coupe en long d'une pile et des demi-voûtes voisines — 3mm



1. Personnel [1]. — *Projet :* M. Hirnschal, « Kreisbaumeister », à Oppeln. Entrepreneurs : MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

1. — Renseignements qu'a bien voulu me donner M. Hirnschal.

Φ_1 (S_2)



SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution que m'ont gracieusement remis MM. Liebold, en 1908.

S_2. — Ce que j'ai vu, — juillet 1909.

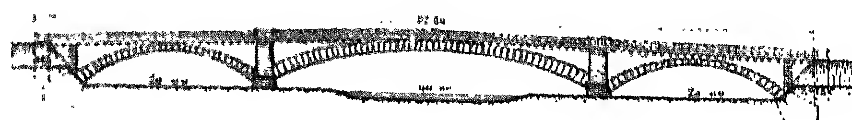
PONT SUR LA FREIWALDAUER BIELE, A GROSS-KUNZENDORF

(ALLEMAGNE, *Silésie*, *Cercle de Neisse*)

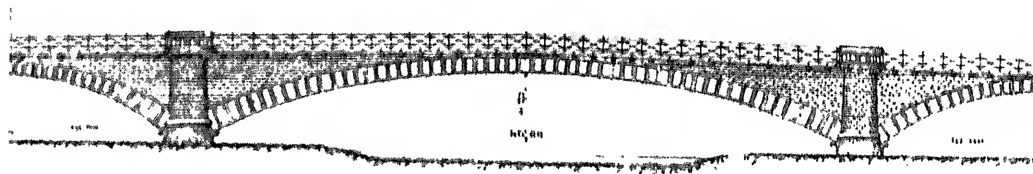
Route de Neisse à Gross-Kunzendorf

$\bar{A}^{n}$ 1de (40m,6)

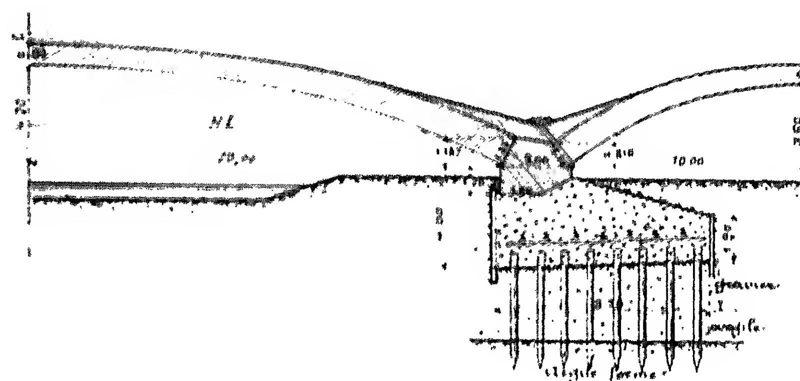
f_1 Ensemble 1mm



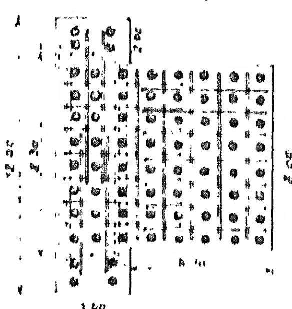
f_2 Grande voûte 2mm



f_3 Coupe en long d'une pile et des demi voûtes voisines 3mm

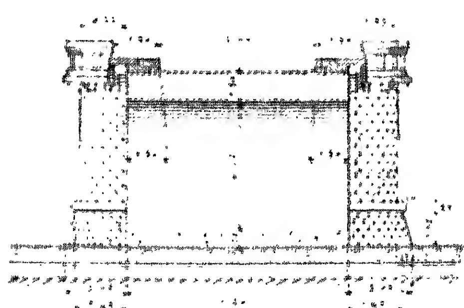


f_4 Pilotis et armature de la pile 3mm

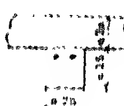


Couronnement 2mm

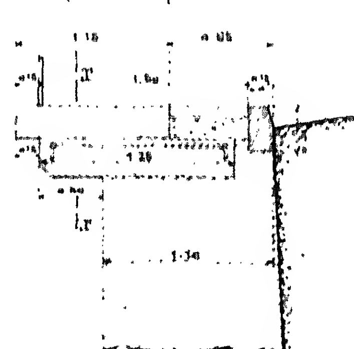
f_5 Coupe en travers à la clef 5mm



f_6 Coupe sur xx de f_7



f_7 Coupe en travers



I. Personnel. — *Projet et Entreprise :* MM. Liebold et Cie, de Langebrück (Saxe).

SOURCE

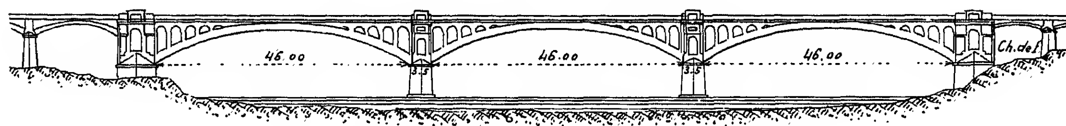
S. Dessins d'exécution qu'ont bien voulu me remettre MM. Liebold, en 1908.

PONT SUR LA MOSELLE, A SCHWEICH[1] *(ALLEMAGNE - Prusse-Rhénane)*

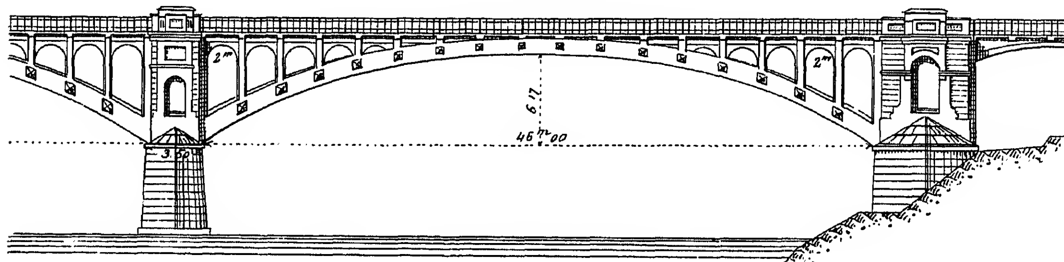
Route de Schweich à Trèves

1905-1906 $\hat{A}^{n}$ r^{te} $(\geqslant 40^{m})^{7}$

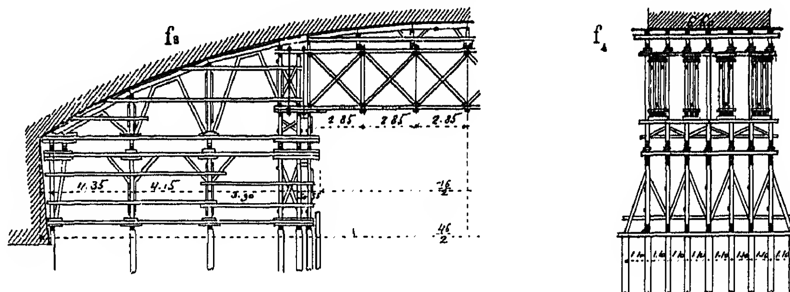
f_1 — Ensemble des grandes arches, amont — $0^{mm}75$



f_2 — Une des grandes arches — 2^{mm}



Cintre de l'arche centrale — $2^{mm}5$



1. Matériaux (S'₁). — Tout est en béton, sauf les parements des avant-becs qui sont en granit.

Au-dessus des naissances, les parements sont colorés en rouge.

2. Quelques observations. — On a réduit, aux têtes, l'épaisseur des voûtes.

Les trottoirs sont coupés au droit de chaque pile par deux joints de dilatation.

Un fer apparent protège les bordures en béton des trottoirs.

1. — Entre le village et la station du chemin de fer d'intérêt local de Trèves à Bullay (Moseltalbahn), à $10^{k}6$ de Trèves. Le pont est à 50^{m} en amont de la station.

Φ_1 — aval (S_2)



3. Dates (S'₁).

Commencement des travaux		mai 1905
Piles et culées		juin – octobre
Grandes voûtes	rive droite	15 – 29 mai 1906
	centrale	fin juin – 7 juillet
	rive gauche	15-29 mai

Décintrement : 4 à 5 semaines après l'achèvement.

Ouverture à la circulation........ 10 octobre 1906

4. Personnel (S''₁). — *Projet et Entreprise :* MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.

Direction des Travaux : M. Möhle, Ingénieur.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1) et renseignements (S''_1), gracieusement communiqués par M. B. Liebold en juillet 1910.

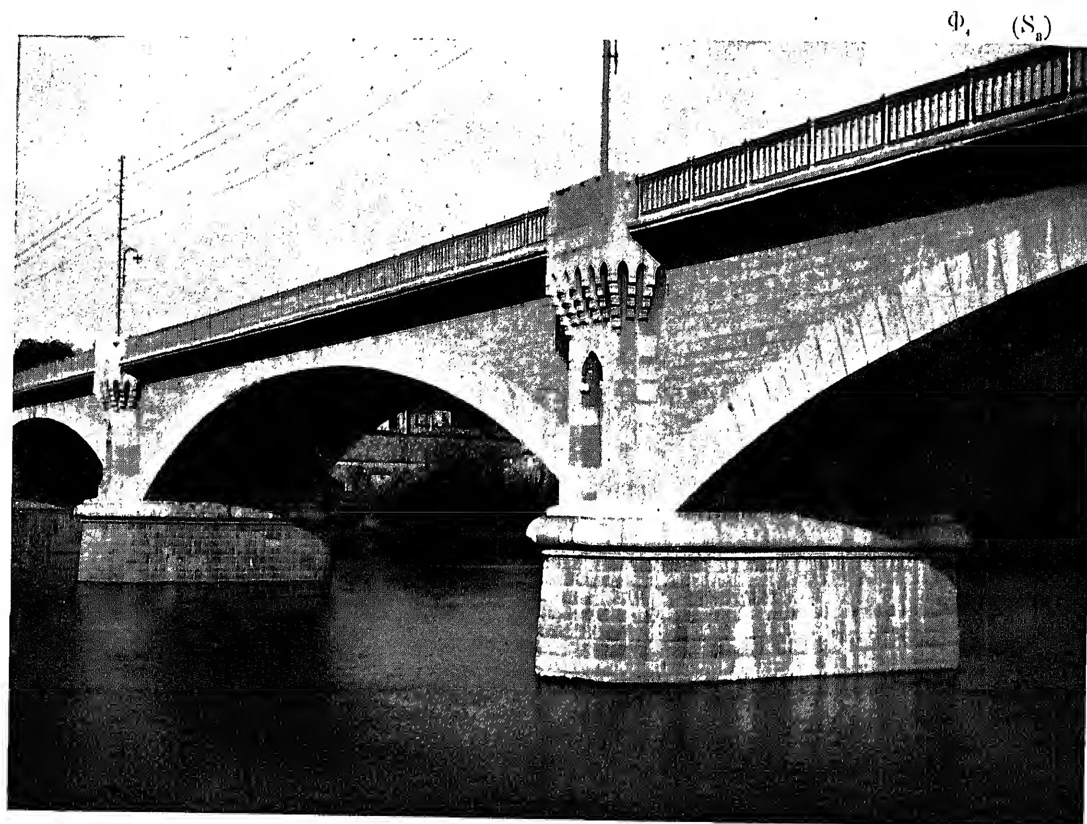
S_2. — Ce que j'ai vu — septembre 1910.

PONT SUR LE BRAS DROIT DU RHÔNE, DIT DE VILLENEUVE, A AVIGNON[1] (VAUCLUSE)

Route nationale n° 100 de Montpellier à Coni

1905–1909 $\overset{\frown}{\mathbf{A}}^{n}$ r^te (⩾ 40m)8

Φ4 (S_a)



1. Principales dispositions et dimensions. — Ce sont celles du pont Boucicaut[2] : même portée, même surbaissement, mêmes courbes d'intrados et d'extrados en projection de chaînette, mêmes épaisseurs des voûtes et des piles, même appareil, même mode d'exécution des grandes voûtes....

Les cordes des voûtes 3 à 9 (f_1) sont horizontales ; celles de rive (1, 2, 10) sont en rampe de 0m30 par arche.

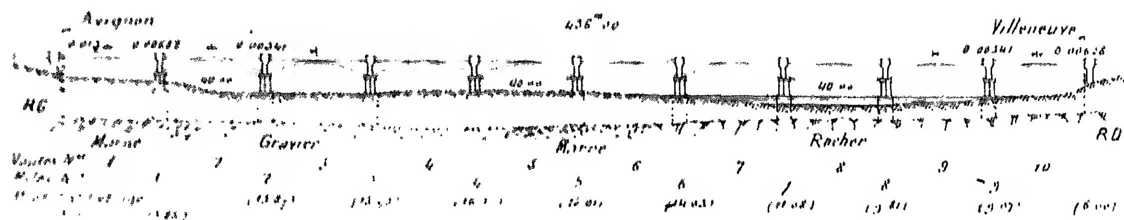
2. Piles. — Les arcades aveugles des pilastres et leurs corbeaux sont imités des remparts d'Avignon : les arcades semblent petites.

3. Trottoirs en encorbellement. — Les trottoirs et le garde-corps en fonte sont en encorbellement sur consoles en béton armé. La largeur disponible entre parapets est ainsi de 10m, pour 8m20 entre têtes.

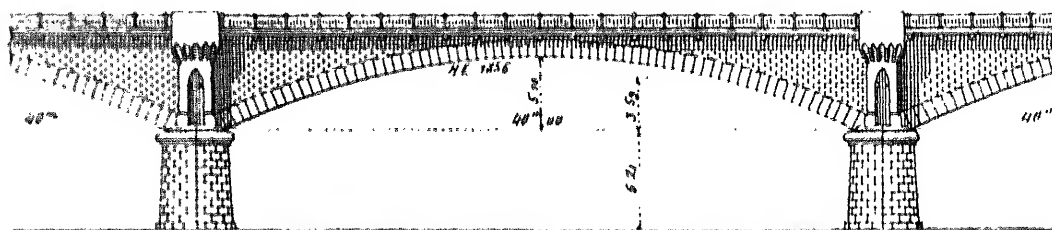
1. — A la place du pont en bois de 1809. On a maintenu la circulation pendant la construction, par une passerelle provisoire en bois, établie à 50m environ en amont.

2. — $\overset{\frown}{\mathbf{A}}^{n}$ r^te (⩾ 40m)2 — Tome III.

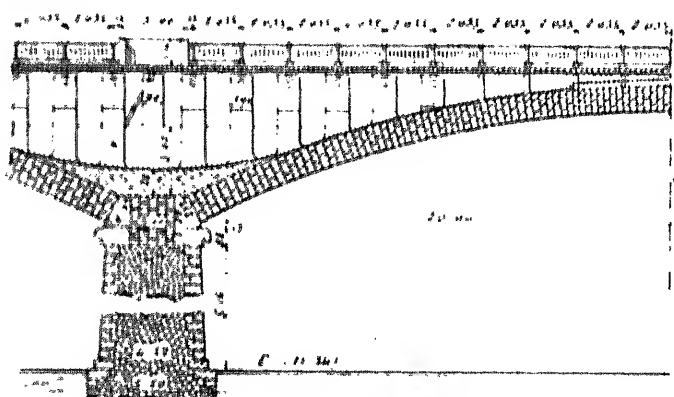
f₁ — Ensemble, amont — 0mm3



f₂ Une voûte 2mm

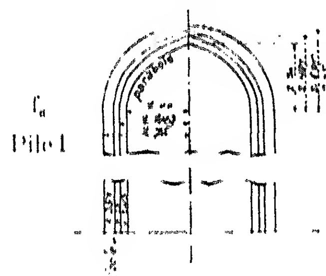


f₃ Coupe en long 3mm



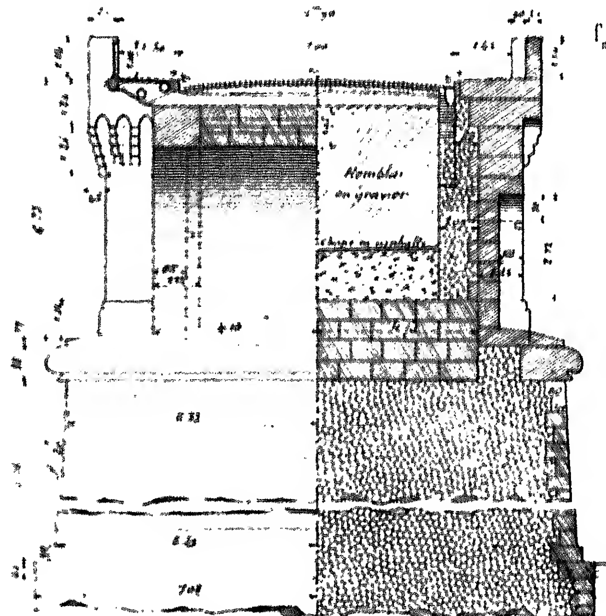
Becs 4mm
Coupe horizontale sous le cordon

f₄ Pile I

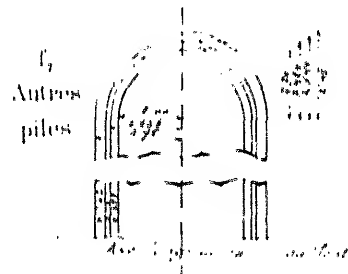


Coupes en travers 5mm
à la clef d'une voûte — sur l'axe d'une pile

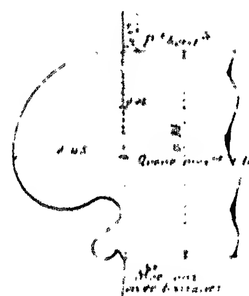
f₅



f₇ Autres piles



f₈ Cordon des piles 3cm



4. Cintres. — Les cintres des 5 arches à partir de la rive gauche ont été réemployés aux 5 autres.

Les palées simples sont enfoncées de 4m environ dans le gravier, au refus de 0m01 par 10 coups d'un mouton de 800k, tombant de 3m.

Les palées doubles reposent sur les fondations en béton de l'ancien pont en charpente.

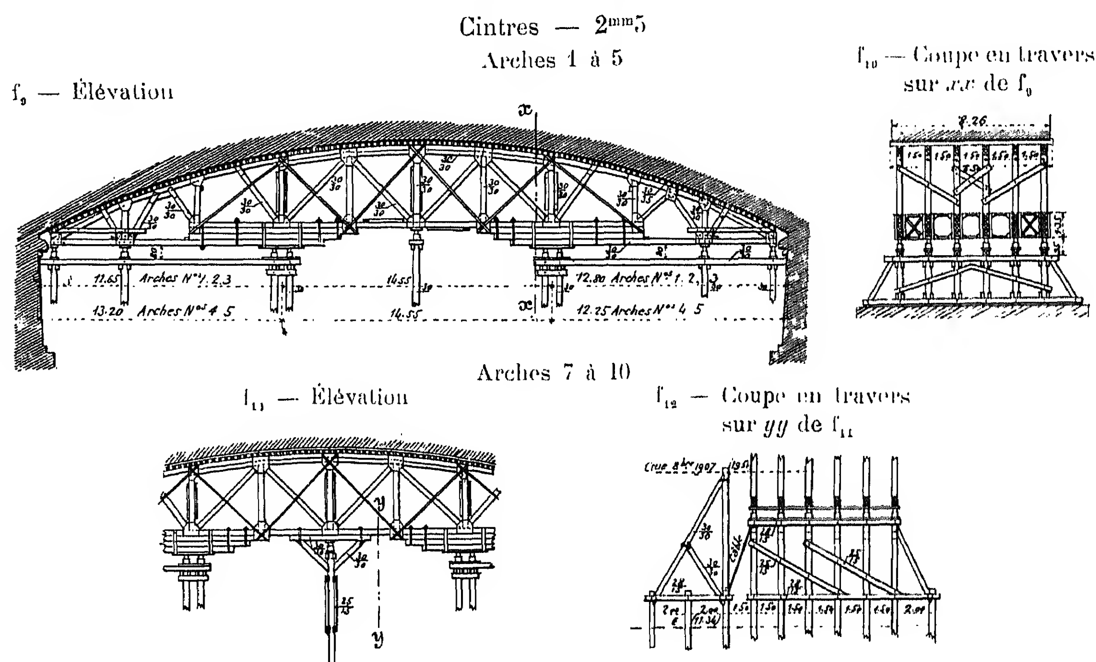
Les cintres ont été montés par 18 charpentiers.

Cintres — 2mm5

Arches 1 à 5

f9 — Élévation

f10 — Coupe en travers sur xx de f9



Arches 7 à 10

f11 — Élévation

f12 — Coupe en travers sur yy de f11

5. Fondations à l'air comprimé (janvier 1905 – mars 1907). — A la pile 4, le rocher était en pente : le caisson s'est déversé de 0m16 environ et, sur une petite partie du pourtour, le couteau ne l'a pas atteint. On a fermé avec des sacs de ciment l'intervalle entre le rocher et le couteau.

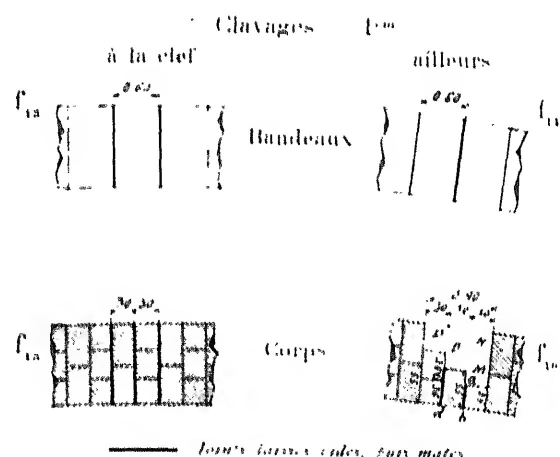
Les chambres de travail ont été remplies de béton de chaux à 2 volumes de mortier à 400k pour 3 de galets.

Les massifs de fondation sont en moellons ordinaires à chaux ; leurs parements, en moellons de choix équarris ; leurs couronnements, en libages.

6. Exécution des voûtes. — Elles ont été construites voûte par voûte, de la rive gauche à la rive droite.

On maçonnait sur toute l'épaisseur ; on ménageait en 9 points (clef, naissances et 3 points intermédiaires de chaque côté, au-dessus des points fixes du cintre), des joints secs, matés ensuite simultanément, au mortier à l'état de sable humide (S_2).

Le mortier de matage était, comme pour le reste de la voûte, à 600k de ciment maritime Pavin de Lafarge. La quantité d'eau variait suivant que le sable était plus ou moins sec ; elle était en moyenne de 180 litres (S_1).



On matait d'abord les bandeaux (f_{13}, f_{14}).

Dans le corps, on matait les joints *ab*, *cd* (f_{14}) ; puis on posait les voussoirs M, N, O, P, dont on matait les joints.

Les joints de matage avaient 8mm aux têtes, 12 à 15mm dans le corps de la voûte.

Quelques poteaux de la passerelle de service traversaient l'emplacement de la voûte pour s'appuyer sur les cintres. On remplissait les vides laissés par eux dans la voûte, et on en matait les joints.

Aux premières voûtes, la courbe d'intrados s'est un peu déformée, parce que les tirants du cintre n'étaient pas bien réglés, et peut-être aussi parce qu'on avait employé quelques bois du vieux pont.

On a occupé à la construction des voûtes 30 maçons et 20 manœuvres.

4 ouvriers faisaient un clavage en 2 à 3 jours.

7. Tassement des cintres.

Voûte n°		*Surhaussement de la clef en mm*	Tassement de la clef en *mm* sous la charge : des 2/5 de la voûte (*Bandeaux posés*) — Tassement observé à la clef	des 2/5 — Tassement propre de la tête des pieux	de la moitié de la voûte — Tassement observé à la clef	de la moitié — Tassement propre de la tête des pieux	des 2/3 de la voûte	des 4/5 de la voûte (*Bandeaux posés*)	de toute la voûte non clavée	de toute la voûte clavée — Tassement observé à la clef	clavée — Tassement propre de la tête des pieux	Nombre de jours entre le clavage et l'observation
1 (R G)	amont	35mm	*Contre charge du pont de service*				19		58			
	aval	17					3		61			
2	amont	31	34	12						57		9 j
	aval	31	29	11						47		
3	amont	45					32 (*Bandeaux posés*)			54	6	2 j
	aval	48					51			73	12	
4	amont	65						60		70		12 j
	aval	67						68		100		
5	amont	57			26					57		22 j
	aval	50			28					72		
6	amont	38					48			52		10 j
	aval	43					36			60		
7	amont	55			42					64		8 j
	aval	43			34					38		
8	amont	43			54 (*Bandeaux posés*)	17				57		2 j
	aval	41			21	18				59		
9	amont	63			45					84		3 j
	aval	59			52					66		
10 (R D)	amont	29			1					38		7 j
	aval	29			10					36		

8. Dates d'exécution des voûtes. — Mouvements, en *mm*, observés à chaque décintrement.

↓ Abaissements, ↑ Relèvements des clefs des voûtes[3]. — ⇄ Mouvements horizontaux des piles.

Voûte n°	Dates de construction: Commencement	Dates de construction: Clavage	Date du décintrement / *Nombre de jours après clavage*		Voûte n° 1 (RG)	Pile n° 1	2	Pile 2	3	Pile 3	4	Pile 4	5	Pile 5	6	Pile 6	7	Pile 7	8	Pile 8	9	Pile 9	10 (RD)
1	1907	1907	1908 20-II	amont	↓ **10**	→ 1,5	↑ 1,1		clavée		clavée		cintre terminé										
RG	11-IX	14-X	*129 j*	aval	**8**	→ 2	0,9																
2	2-XI	29-XI	20-III	amont	↑ 1,8	← 0,8	↓ **7,5**	→ 0,8	↑ 0,8		clavée		non clavée		cintre terminé								
			113 j	aval	1,8	← 1	**8**	→ 1	0,7														
3	10-XII	1908	16-IV	amont			↑ 1,5	← 0,4	↓ **6,1**	→ 0,6	↑ 0,5		clavée		construite à moitié		cintre monté						
		7-I	*100 j*	aval			1,5	← 0,9	**6,4**	→ 0,7	0,3												
4	1908	15-II	15-V	amont					↑ 0,2	← 0,8	↓ **6.6**	→ 0,6	↑ 0,7		clavée		construite au 1/4		3 fermes montées				
	21-I		*90 j*	aval					1,2	← 0,6	**6**	→ 0,5	0,5										
5	29-II	24-III	23-VI	amont							↑ 1,7	← 0,2	↓ **7,8**	→ 0,9	↑ 0,9		clavée		construite aux 4/5		cintre terminé		
			91 j	aval							2	← 0,8	**8,3**	→ 0,8	0.8								
6	2-IV	28-IV	23-VII	amont									↑ 1,5	← 0,5	↓ **6**	→ 0,1	↑ 0,8		clavée		construite à moitié		2 fermes montées
			86 j	aval									1,5	← 0,5	**6**	→ 0,3	0,7						
7	9-V	3-VI	26-VIII	amont									↑ 0,7	0	↑ 3,2	0	↓ **14,5**	0	↑ 1		clavée		construite aux 4/5
			84 j	aval									0,2	0	2,5	← 1,5	**15,2**	0	0,3				
8	10-VI	2-VII	8-IX	amont													↑ 3,8	← 2	↓ **13,5**	→ 0,2	↑ 2,1		clavée
			68 j	aval													4,3	← 2,7	**16**	→ 0,3	1,9		
9	10-VII	3-VIII	29-IX	amont															↑ 4,5	← 1,3	↓ **14**	→ 0,5	↑ 1,2
			57 j	aval															5,0	← 1,3	**19,7**	→ 0,1	1
10	12-VIII	3-IX	18-XI	amont																	↑ 4,8	← 1	↓ **16,2**
RD			*76 j*	aval																	4,4	← 3	**19**

3. — On n'a pas mesuré les abaissements des appuis ; on n'a donc pas le tassement propre des voûtes.

9. Dépenses.

	Fondations	Élévation	Ensemble
Entreprise.	649.660f78	958.423f14	1.608.083f92
Régie........................	14.000f	61.000f	75.000f
	663.660f78	1.019.423f14	1.683.083f92

10. Personnel.

Ingénieurs :

Projet. en chef : M. Dyrion ; ordinaire, M. Armand ;

Exécution. en chef : M. Gubiand ; ordinaires, M. Armand, puis M. Hugues.

Entrepreneur : M. Joseph Fayolle, de Grenoble.

SOURCES :

S_1. — Dessins et renseignements gracieusement communiqués par MM. Armand et Hugues.

S_2. Renseignements qu'a bien voulu me donner M. Gubiand.

S_3. — Ce que j'ai vu janvier 1913.

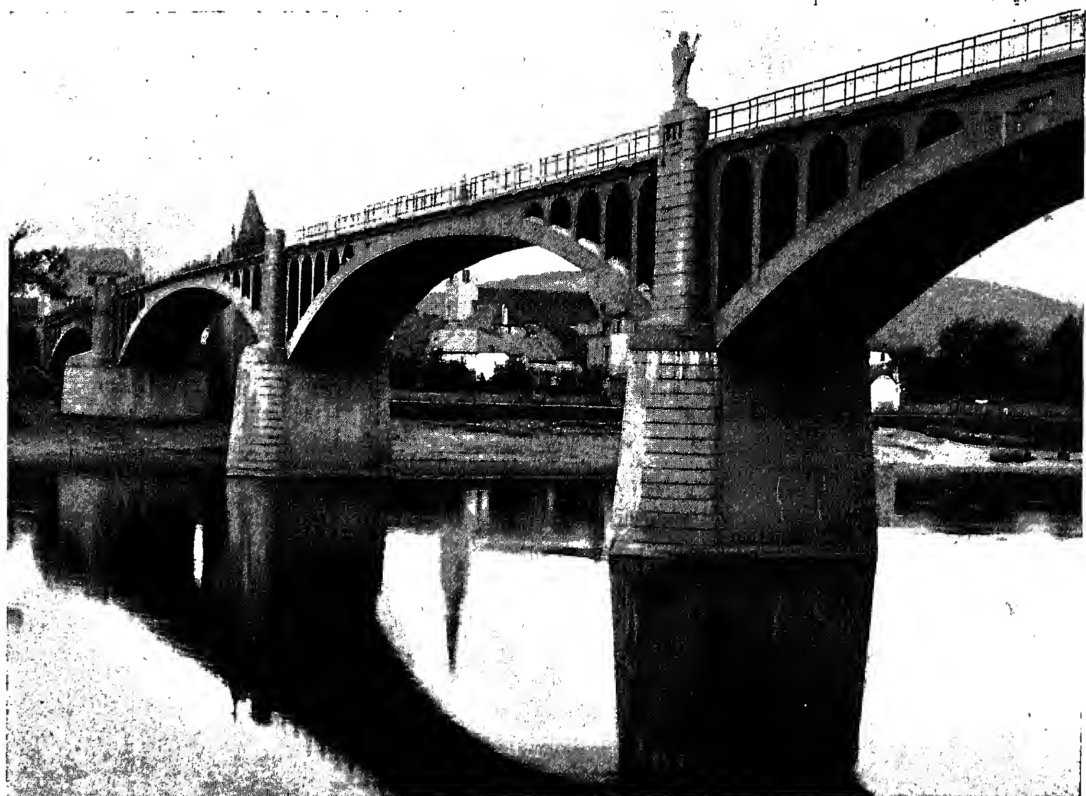
Ce qui n'est pas spécifié S_2 est de S_1.

PONT SUR LA MOSELLE, A TRITTENHEIM *(ALLEMAGNE, - Prusse-Rhénane)*

Route de Trittenheim à Trèves[1]

1907-1908 $\hat{\mathbf{A}}^{n} r^{te}$ ($\geqslant$ 40^{m})9

Φ_1 — amont (S_2)



1. Matériaux (S'_1, S_2). — Tout est en béton, sauf l'arête des avant-becs qui est en granit,

Au-dessus des naissances, les parements vus, sauf les douelles des grandes voûtes, sont colorés en rouge, peut-être pour imiter le grès rouge.

2. Quelques observations. — On a abattu par un chanfrein l'arête d'extrados (S_2).

On a armé les voûtes d'évidement (S''_1).

Au-dessus des piles, la chaussée et les trottoirs sont portés par une dalle en béton armé appuyée sur les pilastres (S''_1).

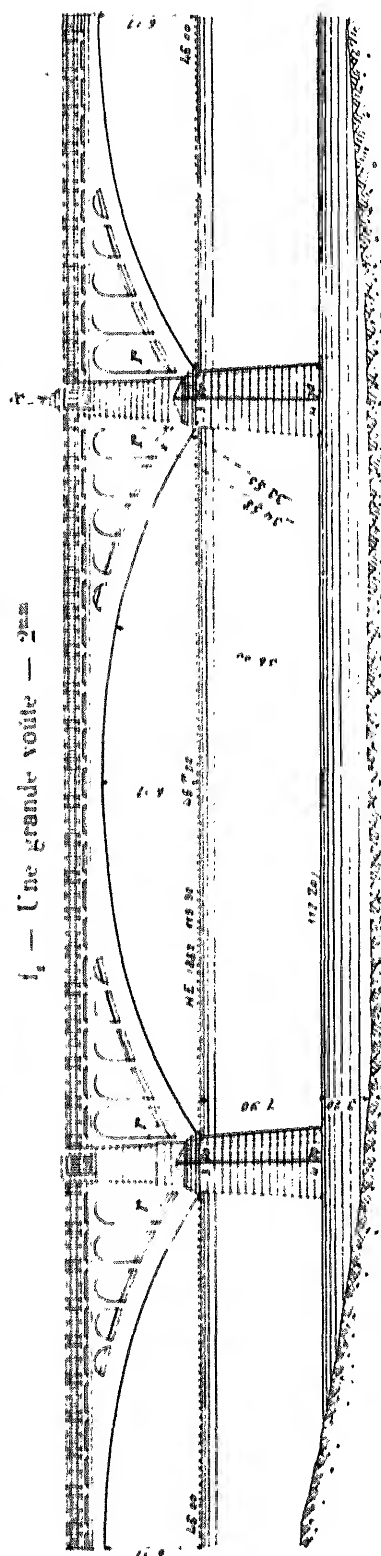
Un fer apparent protège les bordures en béton des trottoirs (S_2).

Le pilastre amont de la pile rive droite porte une statue de Jean Trithemius [2].

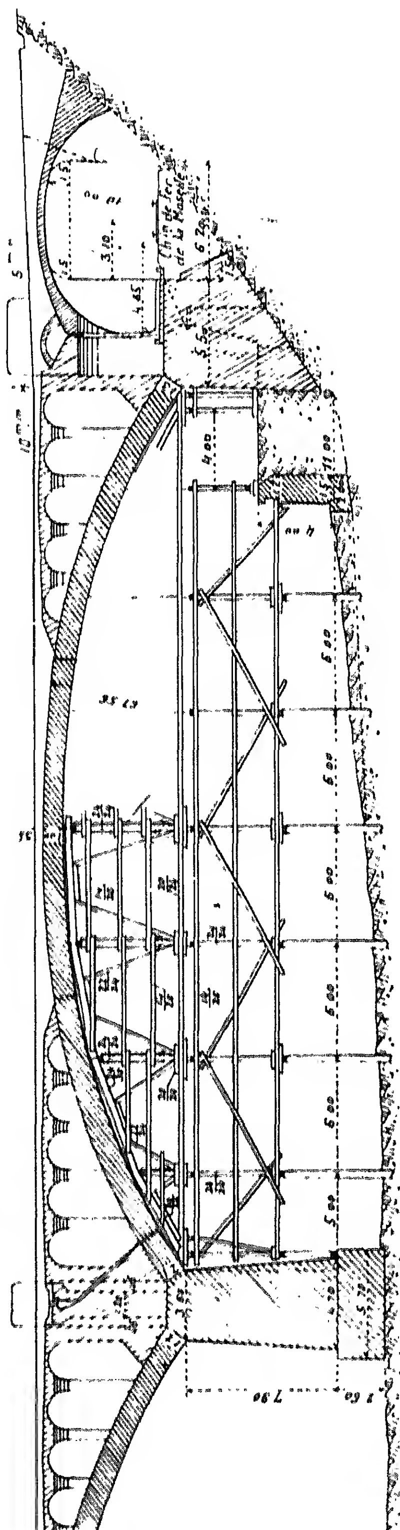
1. — entre le village et la station du chemin de fer d'intérêt local de Trèves à Bullay (Moseltalbahn), à 31^{k}7 de Trèves. Le pont est à 150^{m} en amont de la station.

2. — Historien et théologien, né à Trittenheim en 1462, mort à Wurtzbourg en 1510.

f₁ — Ensemble, amont — 1mm



f₂ — Une grande voûte — 2mm



f₃ — Coupe en long et cintre de l'arche rive droite — 2mm

Elle est à bonne échelle pour les gens qui passent sur le pont, trop petite pour ceux qui le regardent.

Sur le pilastre aval de la pile rive gauche, est une niche pour le préposé au péage.

3. Aspect (S_2). — On voit trop les changements de courbure de l'extrados.

Les dièdres de béton (*r* de f_2) sont d'aspect assez fâcheux.

Les piles des voûtes d'élégissement paraissent maigres.

On n'a pas fait disparaître : aux têtes, les limites des tranches de bétonnage et les empreintes des planches ; en douelle, l'empreinte du platelage.

4. Dates (S''_1).

Commencement des travaux	commencement de juillet 1907
Piles et culées	23 juillet - octobre 1907
Grandes voûtes	4 - 21 août 1908
Ouverture à la circulation	1er janvier 1909

5. Personnel (S''_1). — Celui du Pont de Schweich [3].

3. — $\hat{A}^n$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)7, - Tome III.

SOURCES :

Celles du Pont de Schweich, $\hat{A}^n$ r^{te} ($\geqslant 40^m$)7 - Tome III, p. 269.

PONT SUR LA MOSELLE, A LONGUICH[1] *(ALLEMAGNE, – Prusse-Rhénane)*

Route de Longuich à Mehring

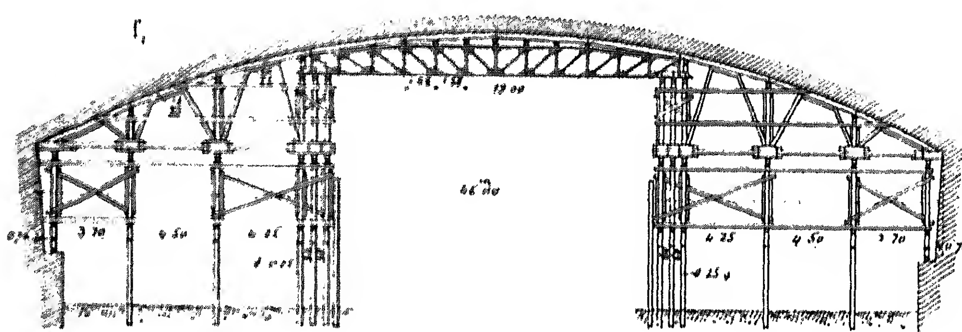
1909–1911 $\bar{A}^{n} r^{te}$ (> 40m) 10

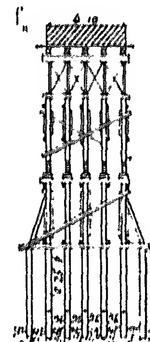
Φ_1 amont (S''_1)



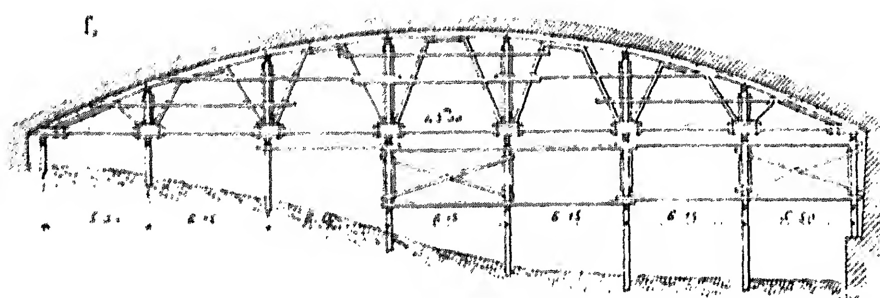
1. Cintres.

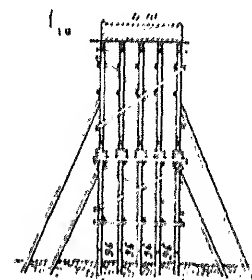
Cintre de l'arche de 46m — 2mm5





Cintre des arches de 43m — 2mm5





1. Station du chemin de fer d'intérêt local de Trèves à Bullay (Moseltalbahn), à 12km5 de Trèves.

f_1 — Ensemble, aval — $0^{mm}75$

f_2 — Les deux grandes voûtes, côté rive droite — 2^{mm}

Coupes en long — 3^{mm}

f_3 — Culée rive droite

f_4 — Pile centrale

f_5 — Coupe en travers sur xx de f_4 — 3^{mm}

f_6 — Bec — 3^{mm}

2. Dates.

Commencement des travaux	2 mai 1910
Piles et culées	commencement de juin - 15 octobre 1910
Grandes voûtes	20 juillet - 8 août 1911
Décintrement	15 septembre 1911
Ouverture à la circulation	1er janvier 1912

3. Personnel.

Projet : M. Herm. Möhle, Ingénieur;
Direction des Travaux : M. C. Möhle.
Entrepreneurs : MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden (Brunswick).

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1), photographie (S''_1) et renseignements (S'''_1), qu'a bien voulu m'adresser M. Liebold, mars 1912.

QUELQUES VOÛTES INARTICULÉES

QU'ON AURAIT, A TORT, CHERCHÉES

DANS LES SÉRIES DU LIVRE I

Après les voûtes inarticulées de 10m et plus de portée, j'en vais décrire sommairement quelques autres qu'on aurait pu chercher dans les séries du Livre I.

Ce sont :

1° des voûtes de 10m ou plus, en béton assez peu armé pour qu'on les ait calculées sans tenir compte du métal. — On les trouve dans des statistiques de voûtes non armées ;

2° des voûtes de 10m ou plus, tombées pendant qu'on les construisait ;

3° des voûtes auxquelles on a attribué à tort 10m ou plus, — voûtes qui existent, — voûtes ruinées, — voûtes qui n'ont jamais existé.

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage*	PROJET							
	ENSEMBLE		GRANDES VOÛTES					
	Longueur de l'ouvrage Déclivité Hauteur maxima de l'ouvrage au-dessus du sol ou de l'étiage	Largeurs { entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la voie portée sur l'extrados	INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons de courbure :* { *à la clef* *aux naissances*	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES { Clef Retombées	COMMENT SONT ARMÉES LES VOÛTES	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1mc de sable, de chaux ou de ciment*	PRESSIONS en $kg/\overline{0^m01}^2$ *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES*
1	2	3	4	5	6	7	8	9
sur la **Delaware** *États-Unis* 1909-1910 *7 voûtes biaises en ellipse :* *5 de 45^m72* *2 de rive de 36^m58* *sous chemin de fer à voie normale.*	*442^m56* $5^{mm}5$ 21^m64	{ 8^m534 *10^m363* Pas de fruit 2^m50 environ	Ellipses { $45^m,72$ *12^m192* $\frac{1}{3,75} = 0,266$ [*42^m86* *6^m50*	{ $1^m,829$ *4^m40 environ* *au milieu de la montée*	A l'intrados et à l'extrados, grillage de barres carrées Épaisʳ (mm) / Écartᵗ (cm) : en long 32 / 53 en travers 25 / 91	B [1] 1^v, 3^v, 5^v		1° Murs transversaux de 0^m91, espacés de 3^m962, portant une plate-forme. Aux têtes seulement, voûtes. Le tout en béton armé 2° *Archivoltes*
de la **Monroe Street** à **Spokane** *États-Unis* 1909-1911 *Pont en 2 anneaux, à une grande arche de 85^m65 en arc peu surbaissé, entre 2 de 36^m58 en plein cintre, sous route.*	*181^m env.* 16^{mm} 39^m36 (étiage)	20^m72 [*Anneaux, en douelle à la clef* *4^m877* Vide entre eux 6^m096 1^m829	Arc de cercle peu surbaissé { $85^m,65$ *34^m67* $\frac{1}{2,470} = 0,404$ *43^m78*	{ $2^m,058$ *$5^m,638$*	Barres carrées de $25^{mm}4$ à l'intrados et à l'extrados	B [1] Corps 1^v, 2^v5, 5^v Clefs 1^v, 2^v, 4^v Culées 1^v, 3^v, 6^v	Pressions avec surcharge : MAX. / min. Clef 36^k4 / 4^k9 Retomb. 20^k7 / 10^k5 *Arc élastique* Surcharge 10 % de la charge totale Chaussée : 2 voitures de tramway de 50^T Rouleau de 15^T Trottoirs : $488^k/1^{m^2}$	1° Sur chaque tête, 2 murs de 0^m61, percés de 10 voûtes transversales en plein cintre de 5^m16 sur piles de 1^m07 reliées par des murs transversaux. Le tout en béton armé. 2° »

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

EN BÉTON PEU ARMÉ

TABLEAU SYNOPTIQUE

EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES: Type, *Matière*, Appareils de décintrement	FERMES: Nombre, *Épaisseur*, Écartement d'axe en axe, *Surhaussement*	Cubo de bois, Poids de fer, Dépenses: Totaux	Cubo de bois, Poids de fer, Dépenses: par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT: État d'avancement du pont; *Temps entre le dernier clavage et le décintrement*; Date	TASSEMENTS DE LA CLEF: sur cintre t_c; au décintrement t'_v; après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q; DÉPENSE D; Totaux et par unité { de surface utile S_p [3]; de volume « utile » W [4] }
11	12	13	14	15	16	17	18
Arcs d'acier à 3 articulations retroussés sur toute la portée	10 » »			A pleine épaisseur, à partir des retombées. Aux voûtes de 45m72, on a laissé la clef ouverte pendant 7 jours.	Voûtes nues		Cube de Béton 39372mc *(Prévisions)*
Près de la clef, barres de longueur variable permettant d'abaisser le cerveau (voir la monographie)		2 cintres pour les 5 voûtes de 45m72.		Aux voûtes de 36m58, 3 clavages : au 1/3 de la 1/2 portée à partir de la clef, puis à la clef. Les parois des clavages avaient 6 redans normaux aux têtes.	*30 jours* »		
Retroussé sur 58m52 (Poutre droite en acier)	4 *30m* 1m177 à la clef			A pleine épaisseur, en 12 tronçons, 9 clavages. On posa d'abord les 2 tronçons de clef, puis les autres symétriquement à partir des naissances.	*1er anneau* » » 8 juin	t_c 38mm t'_v 0	Q 19112mc Q : S_p 5mc09 Q : W 0mc18 D 2590000f D : S_p 690f7 D : W 25f0 D : Q 135f5
Coins en fonte sous les couchis		Le même cintre a servi pour les 2 anneaux.			*2e anneau* » » 10 août	t_c 38mm t'_v 0	

… de la surface de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3) — C'est la surface offerte à la circulation
4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES ⩾ 40m

PONT Date Symbole *En quoi consiste l'ouvrage* 1	PROJET — ENSEMBLE *Longueur de l'ouvrage* Déclivité Hauteur maxima de l'ouvrage au-dessus du sol ou de l'étiage 2	PROJET — ENSEMBLE Largeurs { entre parapets *entre tympans sous la plinthe* Fruit des tympans Revanche de la voie portée sur l'extrados 3	PROJET — GRANDES VOÛTES INTRADOS Portée *Montée* Surbaissement *Rayons de courbure : à la clef, aux naissances* 4	ÉPAISSEURS CORPS ET TÊTES Clef *Retombées* 5	COMMENT SONT ARMÉES LES VOÛTES 6	MATÉRIAUX *Mortier* *Poids, pour 1 mc de sable, de chaux ou de ciment* 7	PRESSIONS en kg/0m01² *Hypothèse adoptée* Surcharges supposées 8	1° ÉVIDEMENTS DES TYMPANS 2° *DÉCORATION DES TÊTES* 9
de **Boberullersdorf** *Prusse* 1908-1909 *Une seule grande arche sous route*	*70m20* 0 12m60	6m00 *5m40* Pas de fruit 0m30	Arc d'anse de panier à 3 centres assez surbaissé 58m,10 *8m80 et 9m60 Moyenne : 9m20* $\frac{1}{6,315}$ = 0,158 *47m* *21m*	1m,00 *1m30*	Fers ronds de 20mm au cerveau à l'intrados	B [1] Ciment......... 1v Sable........... 2v5 Gravier........ 5v (Granit)	Pressions avec surcharge : MAX. / moy. Clef : 39k7 / 24k8 Retombées : 33k6 / 23k 400k/1m² et Rouleau de 23T, ou 1190k/1m²	1° 18 voûtes transversales vues, en plein cintre, en béton armé, de 1m95, sur piles de 0m5, 0m7, 0m8. 2° »
d' **Elsen** *Prusse* 1909-1910 *Une seule grande arche sous route*	*58m* 40mm ⁄ 40mm 7m20	7m00 *7m00* Pas de fruit 0m30	Arc d'anse de panier à 3 centres très surbaissé 46m,00 *5m10* $\frac{1}{9,019}$ = 0,111 *62m90* *38m80*	0m,80 *1m10*	Fers ronds au cerveau à l'intrados	Bandeaux : MEV [1] Calcaire Corps : B [1] Ciment......... 1v Sable........... 2v Pierre cassée... 4v (Calcaire)	Pression max. : avec / sans influence de la température Clef : 51k5 / 50k2 Joints de rupt. : 42k2 / 41k3 Retombées : 30k8 / 25k2 *Arc élastique* 1000k/1m²	1° Pas d'évidements. 2° »
de **Cassel** *Prusse* 1909-1910 *Une seule grande arche sous route*	*79m60* 32mm2 ⁄ 31mm7 8m	16m00 *16m60* Pas de fruit 0m48	Arc d'anse de panier à 3 centres très surbaissé 57m,50 *5m23* $\frac{1}{10,994}$ = 0,091 *90m* *75m469*	1m,10 *1m30*	Fers ronds de 25mm et 15mm au cerveau à l'intrados, aux reins à l'extrados	Bandeaux Grès Corps : B [1] Ciment Vorwohler 1v Sable { basaltique 1v, de la Fulda 1v } 2v Basalte cassé..... 3v Résistance moyenne à 40 j. : 349k	Pressions avec surcharge : MAX. / moy. Clef : » / 35k9 Joints de rupt. : 45k / 28k3 Retombées : » / 30k3 *Courbe de pression construite avec points de passage arbitrairement choisis.* 800k/1m².	1° Entre tympans pleins, 10 murs transversaux de 50cm espacés de 3m, portant une plate-forme de 20cm en béton armé. 2° *Archivolte de 20c de hauteur.*

1. — Pour le sens de ces abréviations, voir Avertissement, Tome III, p. II, n° 6.

EN BETON PEU ARMÉ

TABLEAU SYNOPTIQUE *(Suite)*

EXÉCUTION — GRANDES VOÛTES — CINTRES — FERMES: Type, *Matière*, Appareils de décintrement	Nombre, *Épaisseur*, Écartement d'axe en axe, *Surhaussement*	Cube de bois, Poids de fer, Dépenses — Totaux	Cube de bois, Poids de fer, Dépenses — par mq de douelle [2]	MODE DE CONSTRUCTION	DÉCINTREMENT: État d'avancement du pont; *Temps entre le dernier clavage et le décintrement*; Date	TASSEMENTS DE LA CLEF: sur cintre t_c; au décintrement t'_v; après t''_v	CUBE DE MAÇONNERIE A MORTIER Q — DÉPENSE D — Totaux et par unité de surface utile S_p [3], de volume « utile » W [4]
11	12	13	14	15	16	17	18
Fixe Montants et contrefiches Coins entre billots de bois dur	6 *20cm* 1m04 *150mm*	180^{mc} » »	0^{mc}55 » »	A pleine épaisseur Tranches de 1m50 environ alternées	» *1 mois 1/2 environ* Milieu d'août	t'_v 100^{mm} t''_v 50^{mm}	Q 1 371^{mc} Q : S_p 3^{mc}25 Q : W 0^{mc}32 Fondations / Élévation / Ensemble D 11396f / 62644f / 74040f D : S_p 27f1 / 148f7 / 175f8 D : W 2f7 / 14f8 / 17f5 D : Q » / » / 54f0
Fixe Montants et contrefiches Coins	7 *20cm* 0m88 *120mm*			A pleine épaisseur Tranches isolées	Tympans construits *1 mois 1/2 environ* Octobre	t_c 20^{mm} t'_v 110^{mm} t''_v 0	Q 1 437^{mc} Q : S_p 3^{mc}54 Q : W 0^{mc}31 Fondations / Élévation / Ensemble D 24951f / 41290f / 66241f D : S_p 61f5 / 101f7 / 163f2 D : W 5f4 / 9f0 / 14f4 D : Q » / » / 46f1
Fixe Passe navigable de 6m Montants et contrefiches Coins	17 *20cm* 1m025 *150mm*	» 13574f »	» 14f0 »	A pleine épaisseur Tranches isolées	Tympans construits *1 mois 1/2 environ* Août	t_c 100^{mm} t'_v 40^{mm}	Q 7 383^{mc} Q : S_p 4^{mc}75 Q : W 0^{mc}80 Fondations / Élévation / Ensemble D 11487f / 294210f / 305697f D : S_p 9f0 / 231f0 / 240f0 D : W 1f2 / 31f7 / 32f9 D : Q » / » / 41f4

...al de la *surface* de douelle, voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *A*. 3. S_p = Longueur (col. 2) × Largeur entre parapets (col. 3). C'est la surface offerte à la circulation. 4. W = Surface vue de l'élévation × Largeur entre parapets. 5. W' = Surface de l'élévation au-dessus des fondations × Largeur entre parapets.
Pour S_p, W, W', voir Avertissement, Tome III, p. III, n° 7 — *B*.

VOÛTES INARTICULÉES > 40m EN BÉTON PEU ARMÉ

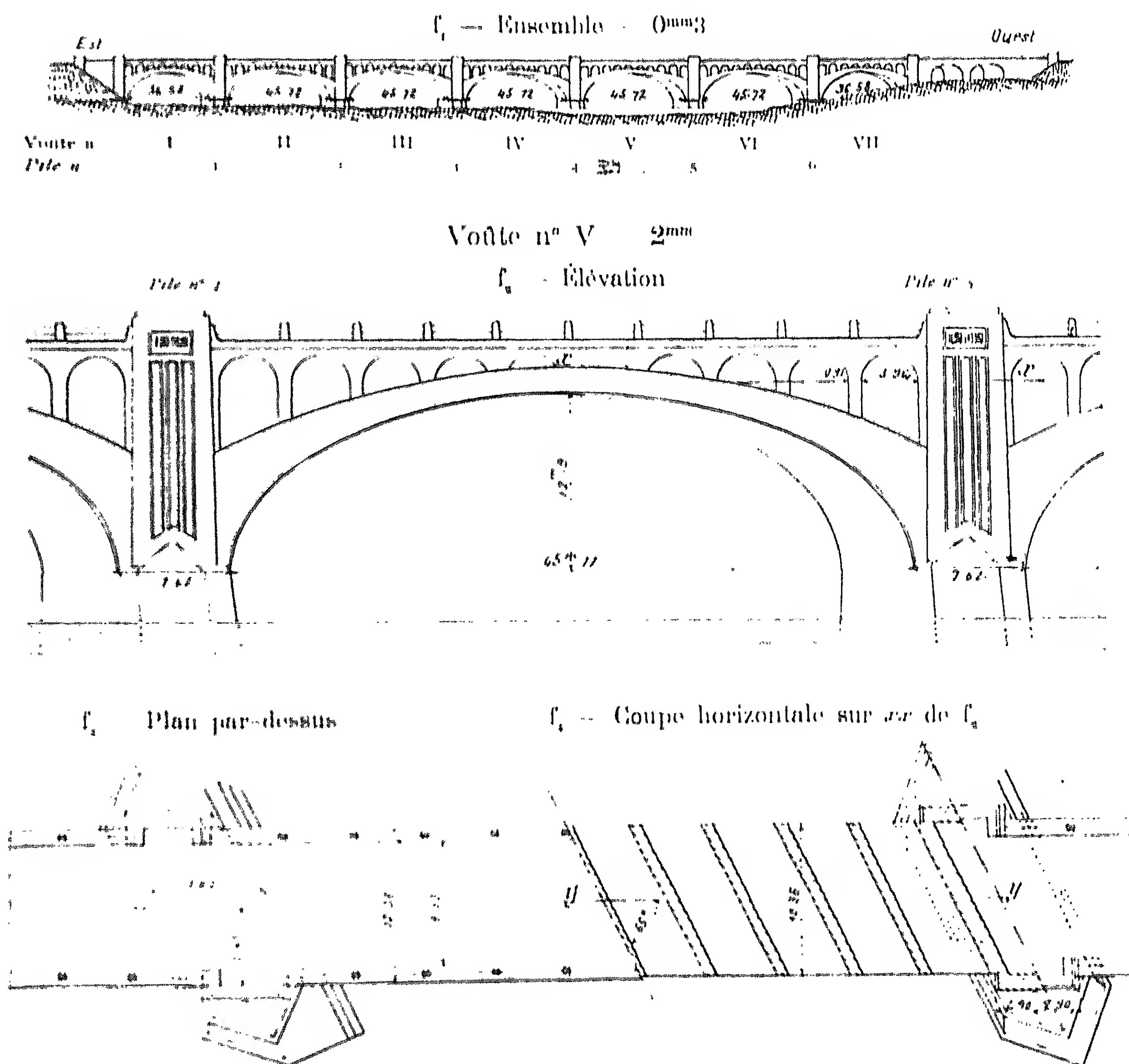
MONOGRAPHIES

1. — PONT SUR LA DELAWARE, PRÈS DE PORTLAND

(ÉTATS-UNIS, — Pennsylvanie)

Raccourci Slateford-Hopatcong (Delaware, Lackawanna and Western R. R.)

1909-1910



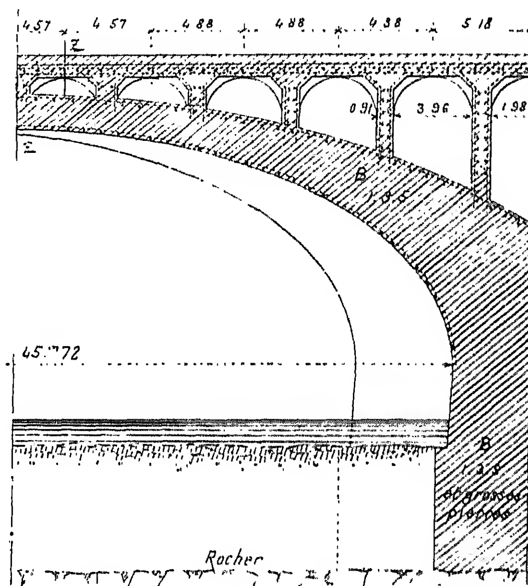
1. Pile-culée n° 4 (f_1). — A la fin de la campagne de 1909, il restait à faire les voûtes V et VI. A cause des glaces, on ne pouvait laisser, pendant l'hiver, la voûte IV sur cintre. On élargit et on renforça la pile 4 (f_2, f_3, f_4).

2. Écoulement des eaux. — Celles arrêtées par la plate-forme sous le ballast sont conduites aux piles, et de là dans le sol.

Celles qui ont traversé la plate-forme, celles qui sont jetées par le vent sur l'extrados, s'écoulent par des sillons *d* (f_6) creusés dans l'extrados, parallèlement aux têtes.

f_6 — Coupe en travers sur *zz* de f_5 — 5mm

f_5 — Demi-coupe en long sur *yy* de f_1 — 2mm5



f_7 — Culée Est
Coupe en travers
2mm5

3. Parements. — Les arêtes des piles en rivière sont en granit.

Aux têtes des voûtes, les planches des cloisons avaient été placées suivant le rayon.



4. Appui des voûtes biaises sur les piles. Les retombées présentaient 6 redans normaux aux têtes.

A la retombée Ouest de la voûte VII (f_1), chacun de ces redans était découpé en gradins horizontaux.

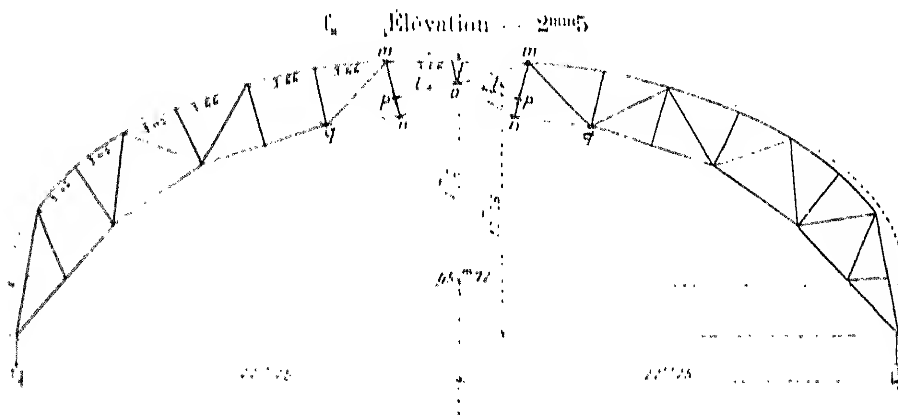
5. Culée Est. — Ses murs sont reliés par des poutres P (f_7) en béton armé.

6. Cintres. — *A. - Voûtes de rive.* — On a bâti l'arche VII sur le cintre, en bois, de l'arche I (f_1), transporté.

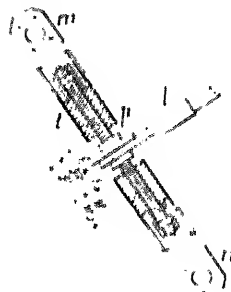
B. – Voûtes de 45m72. — *B₁. Nombre de cintres.* — Ceux des voûtes II et III ont servi aux 3 autres.

Cintre des voûtes de 45m72

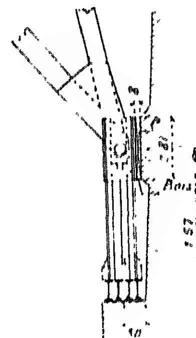
f₈ Élévation — 2mm5



f₁₀ — Appareil de manœuvre (*m n* de f₈) — 2cm



f₉ Appuis — 1cm



B₂. Fermes (f₈). — Chaque ferme est un arc d'acier à 3 articulations, appuyé aux naissances : verticalement, sur le socle de la pile (f₉) ; horizontalement, sur un corbeau *c* en béton (f₉), rasé après décintrement.

B₃. Dispositif pour mettre les fermes à hauteur et pour décintrer (f₈, f₁₀). — Les deux quadrilatères *m q n o* (f₈) sont articulés. Leurs diagonales *m n* sont formées de deux pièces *m p*, *n p* dont les abouts s'engagent dans une tige filetée *t* (f₁₀) à pas de vis contraires. En manœuvrant un levier *l* on fait varier les longueurs *m n* par suite *q o* (f₈) : on peut ainsi abaisser ou relever le cerveau du cintre.

Pour décintrer, on enlève les pièces reliant les fermes, puis on manœuvre les leviers *l*.

B_4. Travail permis. — Sous les charges : à la compression, 11k9/0m001² ; à la tension, 11k2.

Sous les variations de température : la limite même d'élasticité.

Le cintre est une construction provisoire et l'écart maximum de température admis au calcul, 78°, ne pouvait pas se produire.

B_5. Tassements. — Pour un béton pesant 2430k, on avait calculé que le cintre tasserait :

sous le poids propre du cintre .... de 2mm4
sous le poids de la voûte .... de 34mm1
pour un abaissement de température de 78° Centigr .... de 13mm5

Les tassements mesurés ont été sensiblement ceux-là.

7. Personnel.

A. - Ouvrage.

Projet : Ingénieurs en chef : M. Lincoln Bush, M. Am. Soc. C. E., puis M. G. J. Ray ;
Ingénieur : M. B. H. Davis, Assoc. M. Am. Soc. C. E.

Direction des Travaux : M. F. L. Wheaton, Ingénieur.

Entrepreneurs : MM. Smith et McCormick, d'Easton, (Pennsylvanie).

B. - Cintre.

Projet, construction, montage et démontage [1].

McClintic Marshall Construction C°, à Pittsburg.
Ingénieurs en chef : M. Paul L. Wolfel, M. Am. Soc. C. E.
Ingénieur : M. David S. Gendell, Jr.

1. — Démontage sous la direction des Entrepreneurs du Pont.

SOURCES :

S_1. — Engineering News, 30 décembre 1909, p. 713 à 716 : « *The Delaware River* « *concrete Bridge, Slateford-Hopatcong Cut-off ; Delaware, Lackawanna and Western R. R.* »
Les dessins sont de S_1.

S_2. — Railway Age Gazette, 3 janvier 1913, p. 9 à 14 : « *The Hopatcong-Slateford Cut-* « *off* » by C. W. Simpson, Resident Engineer, Delaware, Lackawanna and Western ; p. 12 à 14 : « *Delaware River Bridge* ».

S_1 signale, p. 713, un autre grand pont en béton de la même ligne, sur le Paulins Kill, près de Hainesburg (New-Jersey).

S_2 le décrit, p. 11 et 12. Il a 5 voûtes en plein cintre de 36m58, en béton peu armé.

2. — PONT DE LA MONROE STREET, SUR LE SPOKANE À SPOKANE (*ÉTATS-UNIS, - Washington*)

1909-1911

Φ_1 — aval (S'''_s)



1. Deux ponts jumeaux. — Deux ponts jumeaux, écartés de 6m096, portent une plate-forme en béton armé qui les déborde de 2m90. Sur deux anneaux, larges ensemble de 9m754, on a 20m72 entre parapets.

C'est une réplique des Ponts de la Rocky River [1] et de Walnut Lane [2], comme ceux-ci du pont de Luxembourg [3, 4].

2. Cintre. — Un premier cintre, retroussé, contreventé par des haubans, fut renversé le 21 juin 1910 par un vent de 19m à la seconde.

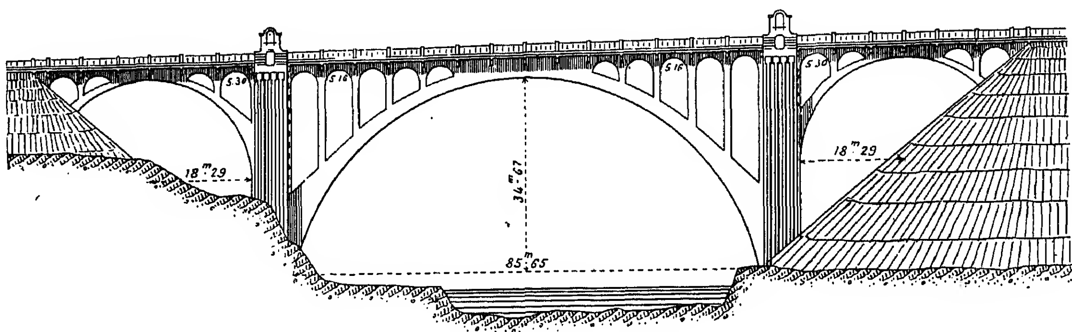
Le cintre a été ripé du premier anneau sous l'emplacement du second.

1. — $\hat{A}^1 \hat{A}^1$ r^{te} (< 40m)^3 2. — $\hat{A}^1 \hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40m)^2 3. — $\hat{A}^1 \hat{A}^1$ r^{te} (< 40m)^1 — Tome II.

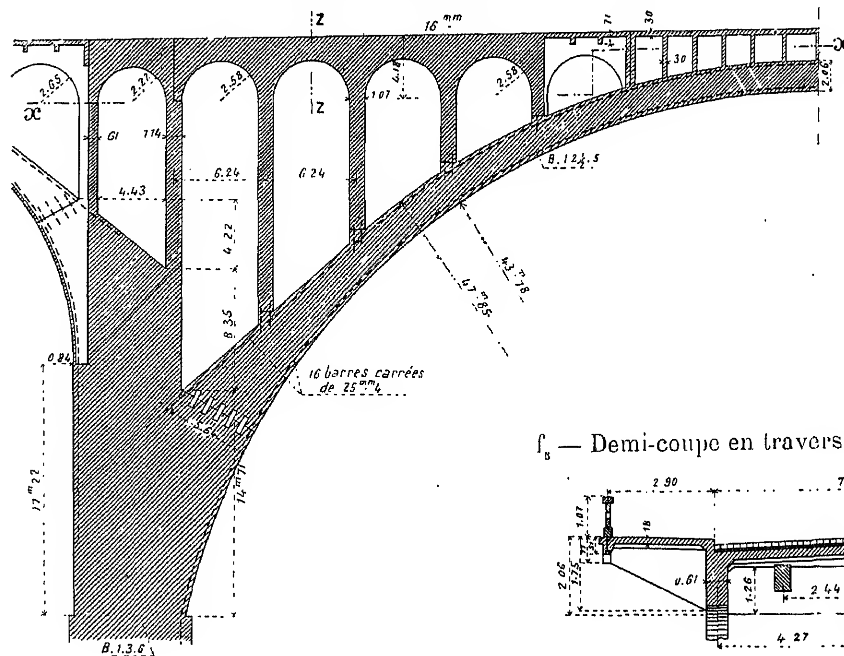
4. — On a récemment exécuté à Pittsburg 2 grands ponts de même aspect :
l'un en trois anneaux, Pont de la Meadow Street, terminé en 1910 (Portée : 63m70) (*Engineering News, 1er décembre 1910*) ;
l'autre en deux anneaux, Pont de la Larimer Avenue, terminé en août 1912 (Portée : 91m57) (*Engineering News, 19 décembre 1912*).

Mais ces deux ponts sont tout entiers en béton armé.

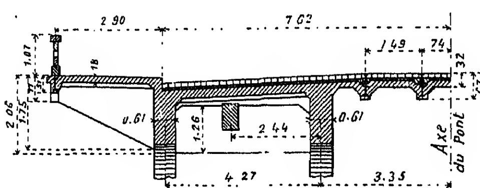
f_1 — Ensemble 0mm75



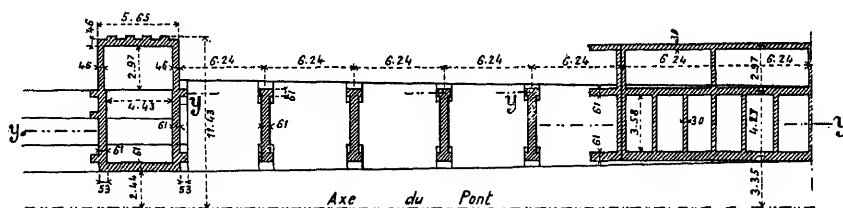
f_3 — Coupe en long sur yy de f_4 — 2mm

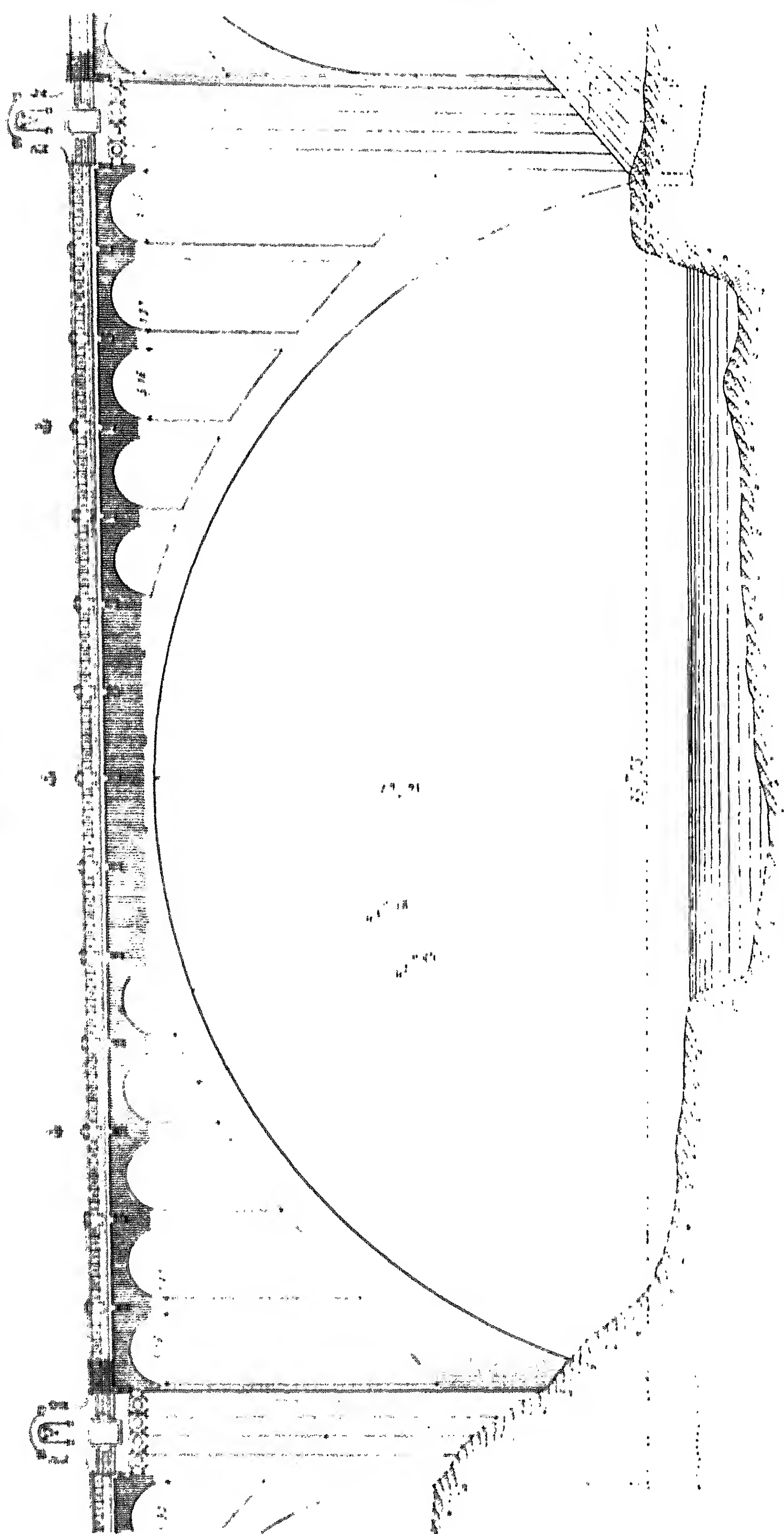


f_5 — Demi-coupe en travers sur zz de f_3 — 5mm



f_4 — Coupe horizontale sur xx de f_3 — 2mm





— Grande arche

Cintre — 1mm5

3. Dates.

Commencement des travaux.. septembre 1909
Achèvement des fondations.. avril 1910

	1er anneau	2e anneau
Grandes voûtes..............................	5-11 mai 1911	5-13 juillet 1911
Décintrement..................................	8 juin	10 août
Ouverture à la circulation......................	23 novembre 1911	

On a attendu 6 mois les poutres d'acier du cintre : l'exécution a duré 1 an 5 mois.

4. Personnel.

Projet : M. John C. Ralston, M. Am. Soc. C. E, « City Engineer ».

Architecture : MM. Cutter et Mulmgreen, Architectes.

Exécution (en régie) : M. John C. Ralston ; puis, à partir d'avril 1910, M. Morton Macartney, M. Am. Soc. C. E, « City Engineer »,

MM. J. F. Greene, P. F. Kennedy et Roy Maloney « Assistant Engineers ».

On a armé les grandes voûtes sur les conseils du Professeur Wm. Burr, de New-York (S''_2).

SOURCES :

S_1. — Renseignements et photographies qu'a bien voulu me donner M. J. C. Ralston, mai 1911.

S_2. — Dessins d'exécution (S'_2), renseignements (S''_2) et photographies (S'''_2) gracieusement communiqués par M. Morton Macartney, - février 1912.

S_3. — Engineering News :

S'_3. — 2 septembre 1909, p. 241 à 243 : « *The Monroe St. Bridge, Spokane,* « *Washington : A concrete bridge containing a 281-ft Arch* ».

S''_3. — 4 mai 1911, p. 546, 547 : « *The Centering for the 281 ft Concrete Arch of* « *the Monroe St. Bridge, Spokane, Wash.* » by P. F. Kennedy.

3. — PONT sur la Bober, a BOBERULLERSDORF

(PRUSSE, - Silésie, - Cercle de Hirschberg)

Route de Boberullersdorf à Boberröhrsdorf

1908-1909

Φ[1] — (S''')



1. Trottoirs. — Ils sont en encorbellement sur des consoles en béton armé (f_4).

2. Parements vus. — Après la construction d'un barrage en aval, le pont sera noyé jusqu'à 2m20 sous la clef. On s'est contenté de recouvrir les parements vus d'un enduit de ciment lissé (S''_1).

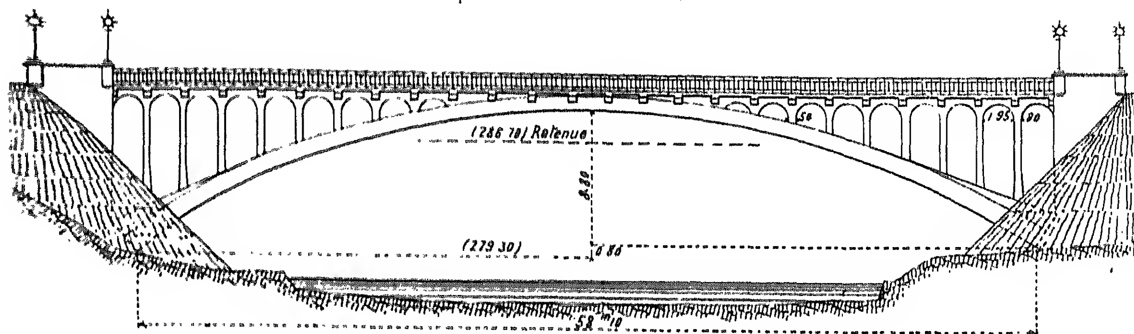
3. Joints de dilatation. — Il y en a 4 au-dessus de chaque demi-voûte.

4. Dates.

Commencement des travaux	8 avril 1908
Montage du cintre	15 mai - 15 juin
Grande voûte	20 juin - 4 juillet
Décintrement	Milieu d'août
Ouverture à la circulation	1909

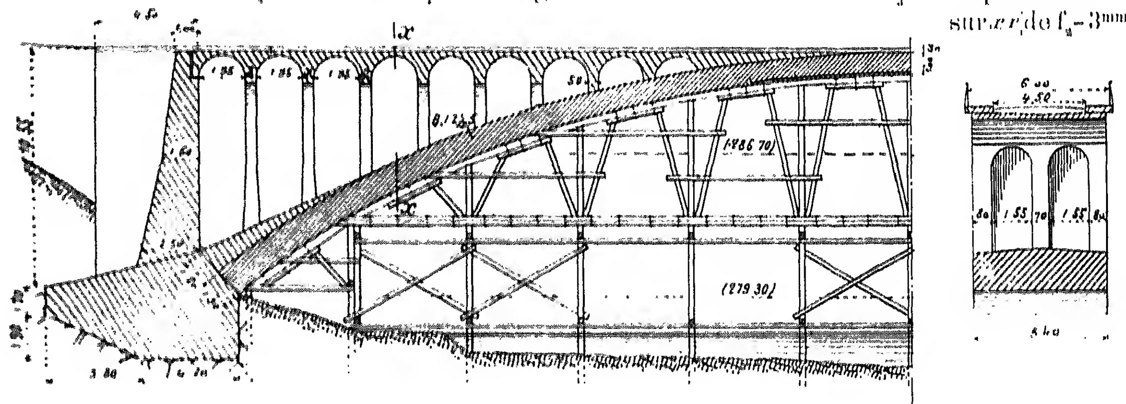
1. — Cliché *Germania*, Hirschberg, Silésie.

f_1 — Élévation — 2mm



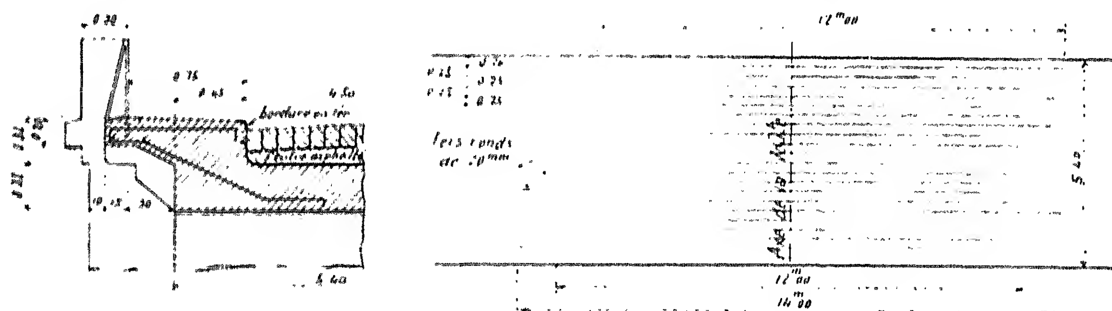
f_2 — Demi-coupe en long et cintre — 3mm

f_3 — Coupe en travers sur xx de f_2 — 3mm



f_4 — Couronnement — 2mm

f_5 — Comment est armé le cerveau de la voûte
Plan — 5mm



5. Personnel.

Projet et Entreprise : MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.
Direction des Travaux : M. Riemenschneider, Ingénieur.

SOURCES :

S_1. — Dessins d'exécution (S'_1), renseignements (S''_1) et photographie (S'''_1), gracieusement adressés par M. B. Liebold, en août 1909.

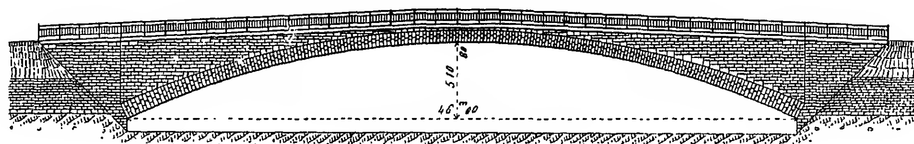
S_2. — Renseignements qu'a bien voulu me donner M. Lau « Landesbaurat » à Breslau.

4. — PONT SUR L'ALME, A ELSEN[1] *(PRUSSE, - Cercle de Paderborn)*

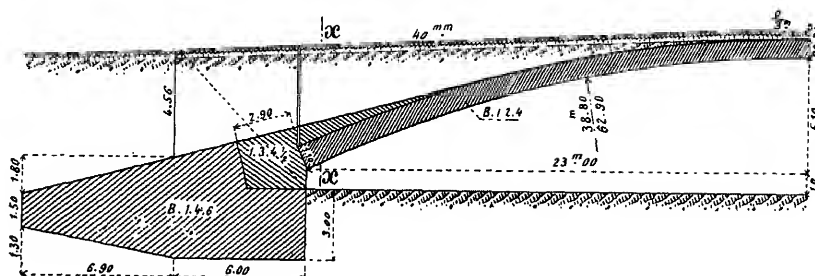
Route de Paderborn à Elsen-Bentfeld

1909-1910

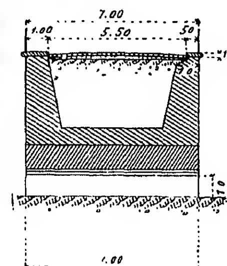
f_1 — Élévation — 2mm



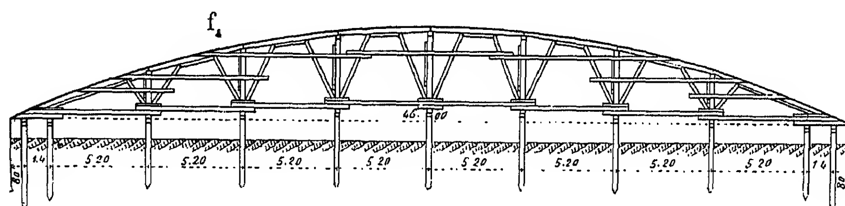
f_2 — Coupe en long — 3mm

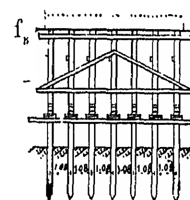


f_3 — Coupe en travers sur xx de f_2 — 3mm



Cintre — 2mm5





1. Joints de dilatation (S_2). — Il y en a 8, à égale distance les uns des autres.

2. Dates (S''_1).

Commencement des travaux	Fin octobre 1909
Grande voûte	1re moitié d'août 1910
Décintrement	Commencement d'octobre
Ouverture à la circulation	Fin novembre

1. — près de Paderborn.

Φ_1 (S'''$_1$)



3. Personnel (S''$_1$).

Ingénieurs.

Projet : M. Wehrmann, « Kreisbaumeister » à Paderborn ;
M. B. Liebold, d'Holzminden.

Direction des Travaux : M. Linnenberg.

Entrepreneurs : MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.

SOURCES :

S$_1$. — Dessins (S'$_1$), renseignements (S''$_1$) et photographie (S'''$_1$) que m'a gracieusement adressés M. B. Liebold, mars 1912.

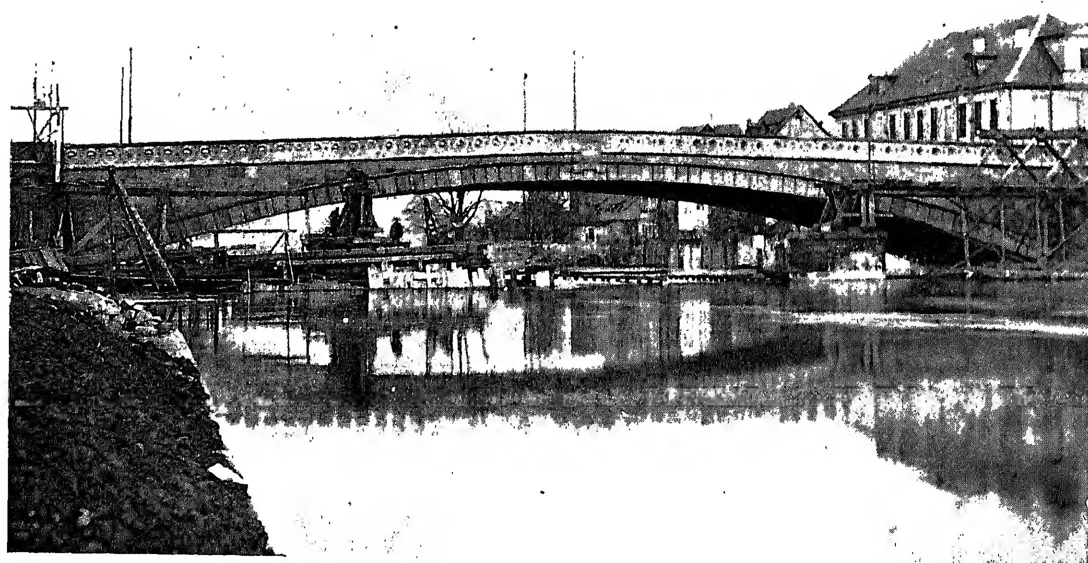
S$_2$. — Dr Ingenieur F. von Emperger. - Handbuch für Eisenbetonbau. Zweite neubearbeitete Auflage. Sechster Band. Brückenbau, p. 513 à 515 : « *Strassenbrücke über die Alme* « *bei Elsen* ».

5. — PONT SUR LA FULDA, A CASSEL *(PRUSSE)*

Rue reliant la vieille Ville à la nouvelle

1909–1910

Φ_1 (S'''_1)



1. Parements vus. — Les bandeaux et tympans sont en pierre de taille (grès jaunâtre du Mein). Les voussoirs de tête sont en saillie de 6cm.

2. Joints de dilatation. — Il y en a un au-dessus de chaque retombée.

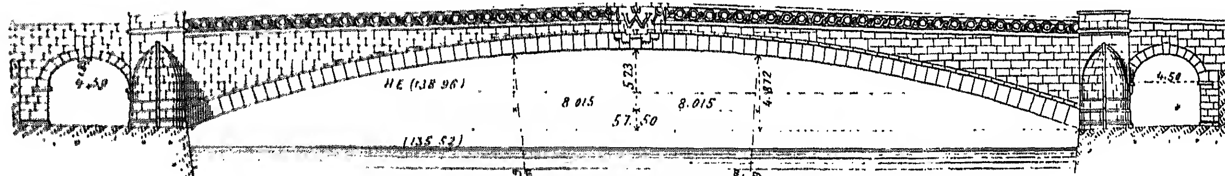
3. Dates.

Commencement des travaux	Milieu d'avril 1909
Grande voûte	Milieu de juin 1910 - commencement de juillet
Décintrement	Milieu d'août
Ouverture à la circulation	Commencement de décembre

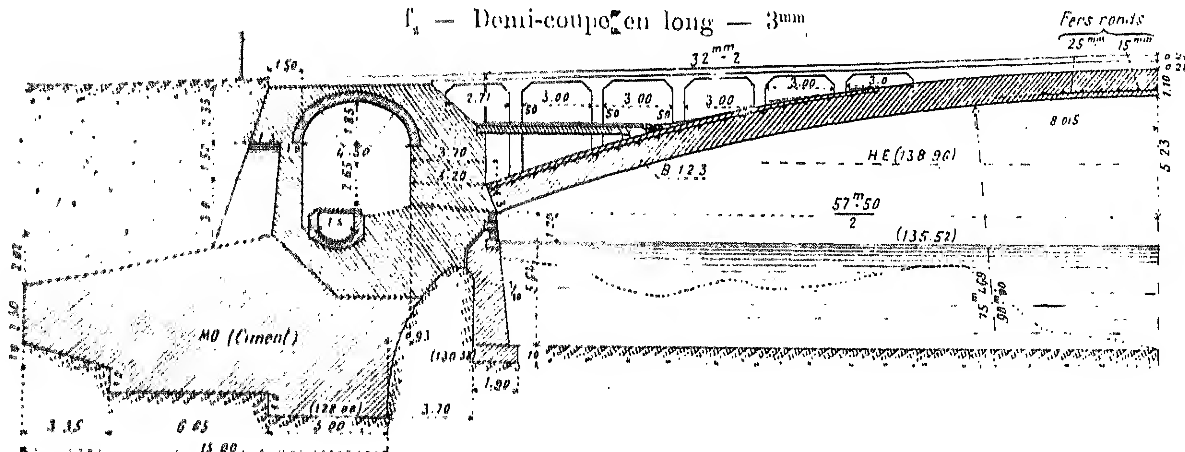
4. Personnel.

Projet et Entreprise : MM. B. Liebold et Cie, d'Holzminden.
Architecture : M. Roth, Architecte à Dresde.
Direction des Travaux : M. Riemenschneider.

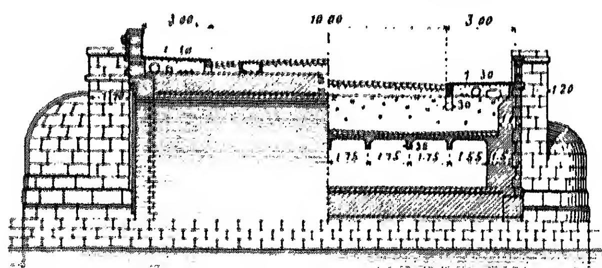
f_1 — Élévation — 2mm



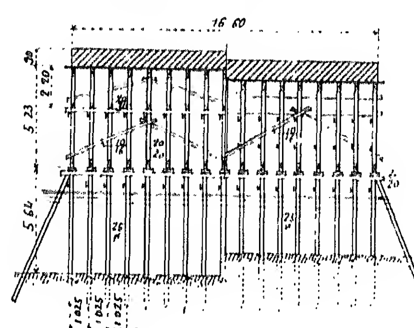
f_2 — Demi-coupe en long — 3mm



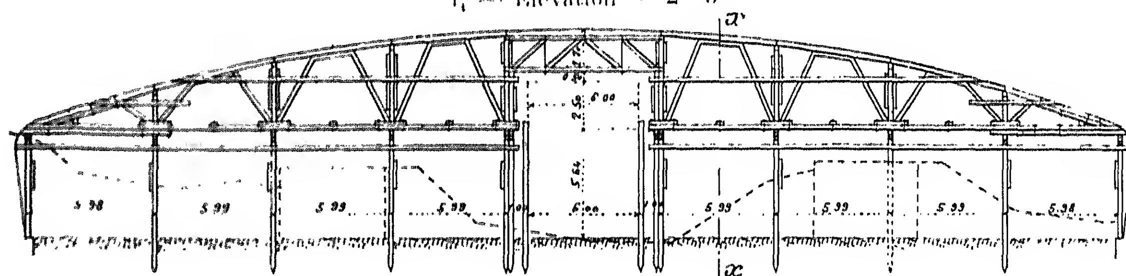
f_3 — Demi-coupes en travers — 3mm
à la clef aux retombées



Cintre
f_5 — Demi-coupes en travers — 2mm5
à la clef sur *xx* de f_4



Cintre
f_4 — Élévation — 2mm5



SOURCES :

S_1. — Dessins (S'_1), renseignements (S''_1) et photographies (S'''_1), gracieusement communiqués par M. B. Liebold, mars 1912.

S_2. — Dr Ingenieur F. von Emperger. — Handbuch für Eisenbetonbau. — Zweite neubearbeitete Auflage. Sechster Band. Brückenbau, p. 509 à 511 : « *Strassenbrücke über die* « *Fulda in Kassel* ».

TITRE II

VOÛTES INARTICULÉES
DE 40M DE PORTÉE OU PLUS
TOMBÉES PENDANT QU'ON LES CONSTRUISAIT

1. — PONT DE MARBRE, A PISE *(ITALIE) (indiqué sous toutes réserves*

Arc de 72m389 (??) tombé en 1644.

« …*le fameux* (pont) *de Pise, essayé par Alexandre Bartolotti d'un seul* « *arc de 121 brasses* (72m389)[1] *de corde,… étant encore sur le cintre et après une* « *dépense de 25.000 Ducats, tomba en 1644, comme Michelini l'avait prédit…* »[2]

---

2. — PONT DE MANSART, SUR L'ALLIER, A MOULINS *(ALLIER)*

Emporté en 1710 (Arche centrale : 44m83)

Le pont d'Hardouin Mansart[3], « Surintendant des Bâtiments du Roy », avait 3 arches en anse de panier[4] : une centrale de 23 toises (44m828), 2 de rive de 17 toises 1/2 (34m108), 2 piles épaisses de 39 pieds (12m669).

1. C'est la portée du Pont de Trezzo, Â[1] 1re (≈ 40m)[1], Tome III, p. 19.

2. « *De la veritable courbe des arches du Pont de la Trinité à Florence* ». Mémoire géométrique et historique de Pierre Ferroni*. (Inseré dans le Tome XIV de la Société italienne des Sciences, 1808). Malibran « *Mission d'Italie, en 1852* ». (Bibliothèque de l'École des Ponts et Chaussées, M. S. n° 469).
* Ferroni, de Florence (1[illegible]-1825), professeur de mathématiques à Pise (Grande Encyclopédie).

3. « …*Il* (Mansart) *fit un pont à Moulins, où il alla plusieurs fois. Il le crut un chef d'œuvre de* « *solidité, il s'en vantait avec complaisance. Quatre ou cinq mois après qu'il fut achevé, Charlus, père du* « *duc de Lévis, vint au lever du roi, arrivant de ses terres tout proche de Moulins,… C'étoit un homme* « *d'esprit, peu content, et volontiers caustique. Mansart, qui s'y trouva, voulut se faire louer, lui parla* « *du pont, et tout de suite pria le roi de lui en demander des nouvelles. Charlus ne disoit mot. Le roi,* « *voyant qu'il n'entroit point dans la conversation, lui demanda des nouvelles du pont de Moulins.* « *Sire, répondit froidement Charlus, je n'en ai point depuis qu'il est parti, mais je le crois bien à* « *Nantes présentement. Comment ! dit le roi, de qui croyez vous que je vous parle ? C'est du pont de* « *Moulins. Oui, Sire, répliqua Charlus avec la même tranquilité, c'est le pont de Moulins qui s'est* « *detaché tout entier la veille que je suis parti, et tout d'un coup, et qui s'en est allé à vau l'eau…* »
(*Saint Simon*, Paris, 1856-1857, L. Hachette, volume 4, p. 144).

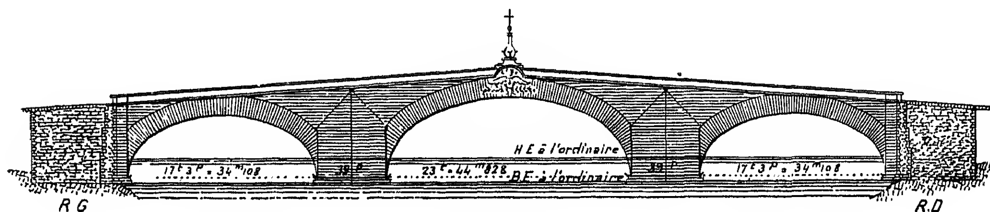
De Regemortes (renvoi 5) specifie que le pont est tombé le 8 novembre 1710. La conversation rapportée par Saint Simon est de quelques jours après.
Or, Mansart serait mort en 1708, (Grande Encyclopédie).

4. D'après des dessins dont l'un, du 20 juillet 1709, est signé comme « vu » par « Mansart de Sagone ».
(Bibliothèque de l'École des Ponts et Chaussées, M. S., n° 1628.)

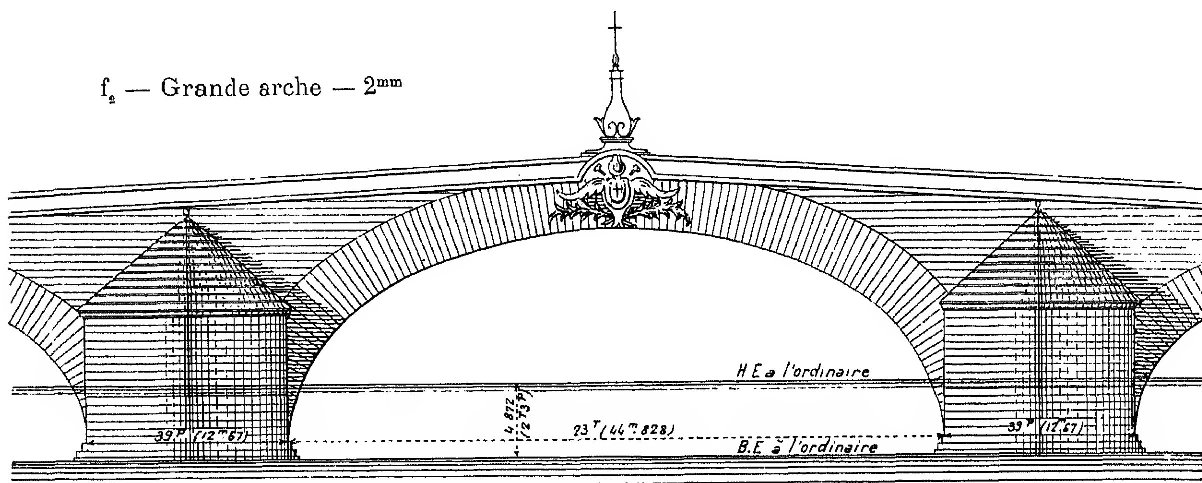
La date et la signature sont d'encre et d'écriture différentes : on a indiqué l'avancement des travaux sur un ancien dessin.

« *La première pierre fut posée le 3 Septembre 1705; les Arches entièrement*
« *fermées étaient encore sur leur ceintre, sans que le dessus du Pont fut achevé;*
« *lorsque le 8 Novembre 1710, une crue occasionna la chûte de la plus grande*
« *partie de cet ouvrage, construit avec un soin & une exactitude tant sur le choix*
« *que sur l'emploi des matériaux, dont il n'y a peut-être point d'exemple.* »[5]

f_1 — Ensemble — 0mm75



f_2 — Grande arche — 2mm



La clef de l'arche centrale était décorée d'un cartouche; au-dessus, devait se dresser une pyramide comme plus tard à Blois (1716-1724).

Tout était fondé sur pilotis; les voûtes étaient construites sur cintre retroussé, du type adopté plus tard par Perronet.

En 1707, les massifs s'élevaient à 3 assises au-dessus des naissances.

Le 20 juillet 1709, les piles étaient montées à mi-hauteur du chaperon; comme plus tard à Blois, l'arrière-bec était en trapèze.

Le débouché total, de 58 toises (113m 04), était tout à fait insuffisant : de là, les affouillements qui ont fait tomber le pont.

Le pont construit plus tard par de Régemortes (achevé en 1763) a 13 arches de 10 toises, soit un débouché de 130 toises (253m 37).

5. — « *Description du nouveau Pont de pierre construit sur la Rivière d'Allier à Moulins, par* « *M. de Régemortes, Premier Ingénieur des Turcies et Levées* », M.DCC.LXXI, Paris, Imprimerie de Lottin, (Avant-propos, p. 1).

3. — PONT SUR LE PANARO, PRÈS DE MODÈNE *(ITALIE)*

Arche de 49m376, tombée en 1789

« *Dans l'Italie entière, il n'y aurait pas eu un pont si extraordinaire et majes-*
« *tueux que celui que Bolognini... voulut de nos jours élever sur le Panaro, le*
« *composant d'un seul arc de 152 pieds de Paris de corde* (49m376), *18 de flèche*
« (15m592) *et 8 d'épaisseur à la clef* (2m599), *sur la nouvelle route de Modène...*
« *mais... quoique moins grand... il eut le même sort sinistre... déjà arrivé à*
« *Bartolotti.* »[6].

Au sujet de cet ouvrage, M. l'Ingénieur en chef Zanotti a bien voulu consulter le Directeur des Archives de Modène, M. Giovanni, lequel lui a donné les renseignements que voici :

Une ordonnance du duc Hercule III, en date du 19 mars 1786, approuva la construction d'un pont à une arche sur le Panaro, de 152 pieds d'ouverture, 48 pieds de flèche, appelé Pont Saint-Ambroise, à construire sous la voie Émilienne, entre Modène et Bologne, à environ 6k de Modène.

On commença les travaux le 24 avril 1788 ; mais, le 24 juin 1789, le cintre céda, entraînant la voûte.

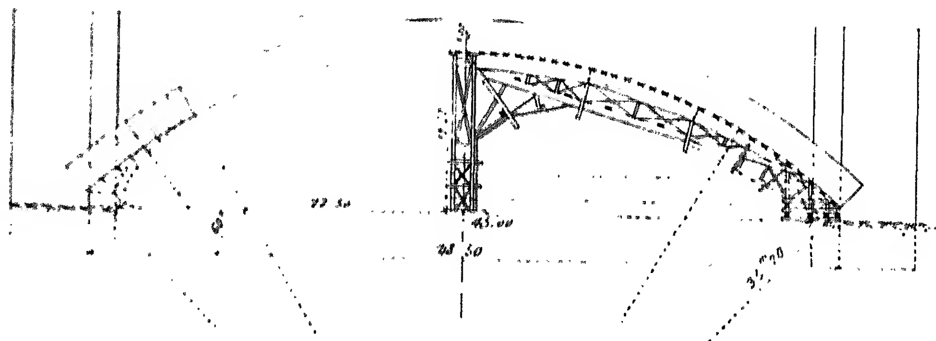
4. — PONT DE SAINT-GEORGES, SUR LE LIRI *(ITALIE)*

Route de Formia à Cassino

Voûte de 45m tombée en 1873[7]

L'entrepreneur devait exécuter l'ouvrage en deux ans, pour 134.000 lires.

Élévation et Cintre



En 1872, on construisit les culées ; en 1873, le cintre et la voûte. On allait la terminer[8], lorsque, dans la nuit du 15 octobre, elle s'écroula avec son cintre.

6. Source indiquée *renvoi* 2.

7. « *Sulle cause che produssero la ruina del Ponte in muratura sul Liri presso S. Giorgio.* » Conferenza dell'Ingegnere Pasquale Sasso.
(*Estratto dagli Atti del Collegio degl' Ingegneri ed Architetti in Napoli*, Anno V, fasc. 6°, Nov. e Dic. 1880), Naples, 1880.

8. — « *che, compiuta quasi, ruinò...* »

Il paraît que l'exécution n'a pas été conforme au projet.

Le cintre était d'un mauvais type, en mauvais bois, et mal exécuté [10].

---

10. — Le même entrepreneur construisit, en 1878, un pont de 20^m sur le Vulturne : il s'écroula au décintrement. Il subsista, encastrée dans une culée, une plaque de marbre portant son nom.

TITRE III

VOÛTES INARTICULÉES AUXQUELLES ON A ATTRIBUÉ A TORT 40m DE PORTÉE OU PLUS

III. A. — PONTS QUI EXISTENT, MAIS QUI N'ONT PAS 40m

1. — PONT SAINT-MARTIN, SUR LE TAGE, A TOLÈDE

(ESPAGNE, — Nouvelle-Castille)

Φ_1 — amont [1]



On lui a attribué une portée de 40m25 [2].

L'ouverture, difficile à mesurer directement, est réellement de 39m75 ; la montée, de 20m45 [3].

1. Photographie gracieusement donnée en 1908 par M. Carlos Alfonso, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Directeur des Travaux Publics de la Province de Tolède.

2. — Croizette-Desnoyers : « *Construction des Ponts* », Tome I, p. 43, Pl. IV, fig. 8.

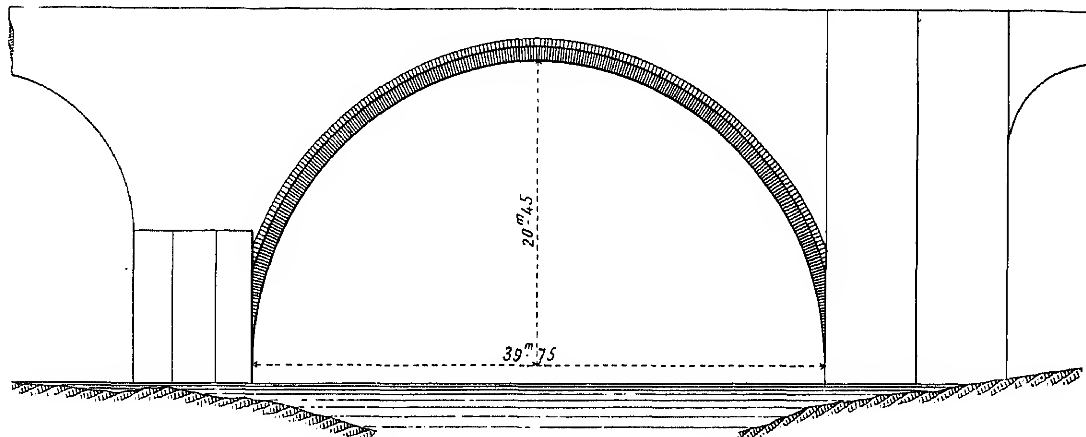
3. — Ces dimensions ont été gracieusement relevées, sur ma demande, en mai 1908, par les soins de M. l'Ingénieur en chef Carlos Alfonso.

C'est la plus grande voûte d'Espagne [4].

L'intrados est une ogive mousse, très peu surhaussée, presque un plein cintre.

Les têtes sont en deux rouleaux superposés, celui de dessus en saillie. Les bandeaux et la douelle sont en granit [5].

f_1 — Grande arche - amont — 2mm



Voici quelques indications empruntées à l'histoire d'un Archevêque de Tolède [6] :

Il y eut là un pont romain, emporté par une crue en 1211 [7] ou en 1203 [8].

4. — Voici les plus grandes voûtes d'Espagne : toutes sont antiques :

	Intrados	Portée	Montée	Siècle	
Pont St-Martin, à Tolède	Ogive surhaussée	39m75	20m45	XIVe	
Pont d'Orense, sur le Miño	id.	37m60	19m60	XIVe ?	Voir sa monographie, p. 311.
Pont de Martorell, sur le Llobregat	Ogive surbaissée	37m30	15m20	?	id. p. 314.
Pont d'Almaraz, sur le Tage (*Province de Cacérès, Route de Madrid à Cacérès*).	Plein cintre / Ogive	38m / 32m46		XVIe ? restauré en 1842-45	Indications qui m'ont été données, en 1885, par l'Ingénieur de Cacérès. — Croizette-Desnoyers, Tome I, p. 59, Pl. VI, fig. 12.

5. — Renseignement pris, sur ma demande, par M. Renaudot, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

6. — S_1 - « *Historia de D. Pedro Tenorio, Arçobispo de Toledo* » por El. D. (Doctor ?) Eugenio Narbona, natural de la ciudad de Toledo, su Capellan, — Tolède M.DC.XXIIII (Bibliothèque Nationale, Oo. 664).

7. — S_1 - p. 111 (verso) « *comme en témoignent les Annales de Tolède* ».

8. — S_1 - p. 114 (recto).

Inscription sur une plaque de marbre blanc posée sous Philippe II :

PONTEM CVIVS RVINAE INDECLIVII ALVEO PROXIME VISVNTVR. FLVMINIS INVNDATIONE QVAE ANNO DOMINI M.CC.III SVPER IPSVM EXCREVIT DIRVTVM. TOLETANI IN HOC LOCO EDIFICAVERVNT. IN BECILA (sic) HOMINVM CONSILIA. QVEM IAM AMNIS LAEDERE NON POTERAT PETRO, ET HENRICO FRATRIBVS PRO REGNO CONTENDENTIBVS, INTERRVPTVM PETRVS TENORIVS ARCHIEPISCOPVS TOLETAN. REPARANDVM CVRAVIT

Les Toledans en bâtirent un nouveau, un peu en amont, avec 2 tours et 2 portes. Plus tard, demeurés fidèles à Pierre Ier (le Cruel), ils furent assiégés par son frère Henri de Transtamare, et, pour se défendre, ruinèrent la grande arche [9] de leur pont (1368, 1369?).

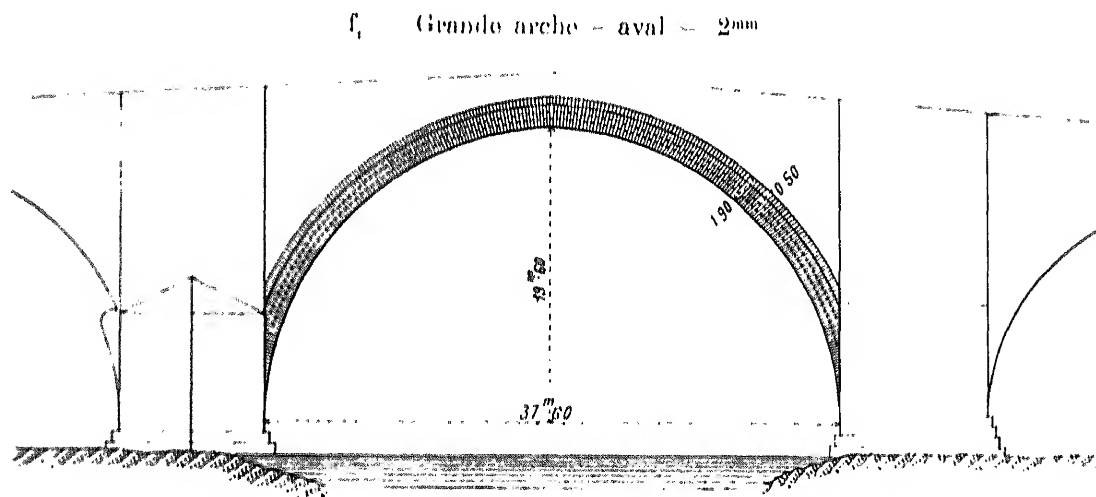
Don Pedro Tenorio, Archevêque de Tolède de 1376 à 1399, fit reconstruire la grande voûte, achever les tours [9, 10, 11].

Philippe II y fit quelques réparations.

2. — PONT D'ORENSE SUR LE MIÑO (*ESPAGNE, – Galice*)

Route de Villacastin à Vigo,
entre la ville d'Orense et le chemin de fer de Monforte à Vigo.

f_1 Grande arche – aval – 2mm



Le pont d'Orense a 7 arches, dont 5 en ogive.

9. — S_1 – p. 112 (verso).

10. — S_1 – p. 113 (recto). – Eugène de Narbonne conte cette jolie anecdote :
Le Constructeur s'aperçut, la voûte presque clavée, qu'il s'était trompé dans ses projets, et qu'elle tomberait surement au decintrement; il confia ses angoisses à sa femme. Celle-ci, jalouse de la reputation de son mari, mit, une nuit, le feu aux bois du cintre ; l'arche s'écroula, mais sa chute fut attribuée a l'incendie.
L'Archeveque repara, à ses frais, le dommage. La femme lui avoua ce qu'elle avait fait, et pourquoi : le Prelat gouta fort son action, et l'en recompensa.

11. — Sur le « Pont de l'Archevêque » s'elevaient deux hautes tours. (Los Reyes nuevos de Toledo. Christoval Lozano, 1667. — Bibliotheque nationale. *Ol.* 387. Réserve, p. 267).
On ne les y voit plus.

A la voûte du milieu, on a attribué une ouverture de 44^m[12], 43^m45[13], 39^m[14].

Elle a, réellement, 37^m60 de portée et 19^m60 de montée; elle est légèrement surhaussée, en ogive peu pointue, comme celle du pont Saint-Martin, à Tolède.

Φ_1 — Arches centrales, - aval[15].



La base des piles de la grande voûte est à grand appareil, peut-être romain.

Toute l'élévation est du moyen-âge : par les rampes qui étaient de 91^{mm} et 66^{mm} avant la modification de 1880; — par ses ogives, dont quelques-unes ont un joint à la clef; — par le petit appareil de ses voûtes; — par ses becs pointus; — par ses deux rouleaux superposés de 1^m40 et 0^m50.

Aux reins de la voûte, on voit des trous carrés comme au pont de Céret[16] : sans doute des trous de boulin pour appuyer le cintre.

Tout est en granit : il y a quelques mauvaises pierres.

Ces renseignements ont été, sur ma demande, gracieusement donnés par M. Juan B. Uriarte, Ingénieur des Ponts et Chaussées à Orense.

12. — Germond de Lavigne : « *Itinéraire de l'Espagne* », — Paris, 1866, p. 273. — M. Alfred Léger : « *Les travaux publics, les mines et la métallurgie au temps des Romains.* »
Dans la Statistique des Annales des Ponts et Chaussées d'octobre 1866, p. 542ter, nº 25, j'ai reproduit cette indication « *sous toutes réserves* ».

13. — M. L. Gaztelu, Marquis d'Echandia : « *Los grandes Arcos de Fábrica en los Puentes de España* ». (Revista de Obras Públicas, 12 juin 1899).

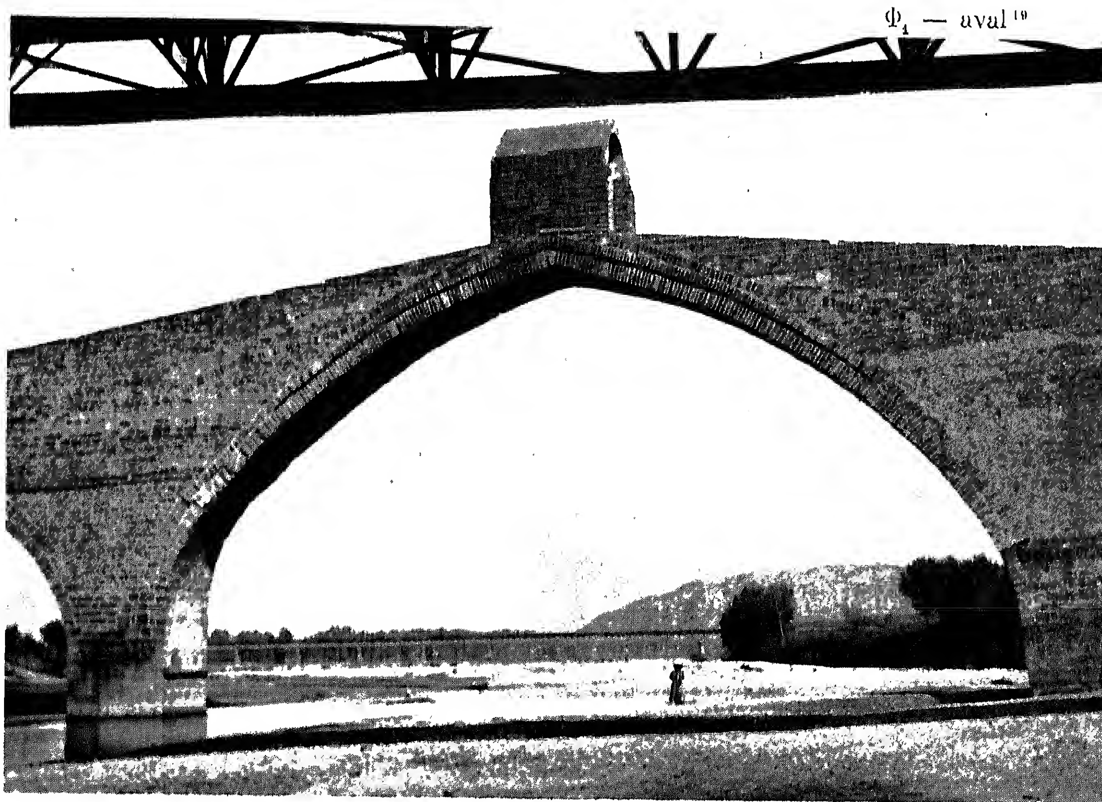
14. — Croizette-Desnoyers, « *Construction des Ponts* », Tome I, p. 45.

15. — Photographie qu'a bien voulu remettre M. Juan B. Uriarte.

16. — **C**¹ rte ($\geqslant 40^m$)¹ — Tome I, p. 15.

3. — PONT DU DIABLE, SUR LE LLOBREGAT[17], A MARTORELL[18]

(*ESPAGNE, – Catalogne*)



Voici les dimensions exactes de la voûte[20] :

Portée... 37m30, Montée... 15m20.

C'est une ogive surbaissée, forme rare et intéressante, — déformée en élévation et en plan. Une petite chapelle en charge utilement la pointe.

D'après l'appareil et le mode de construction, les culées, les bases des piles et l'arc de triomphe de la culée gauche, qui sont en grandes pierres de taille, sont romains. Les voûtes actuelles, en deux rouleaux superposés, et en petits matériaux, sont du Moyen-âge.

17. — et non sur la Noya comme le disent à tort Gauthey (*Construction des Ponts*, Tome I, p. 35), puis Cronzette-Desnoyers (*Construction des Ponts*, Tome I, page 43).

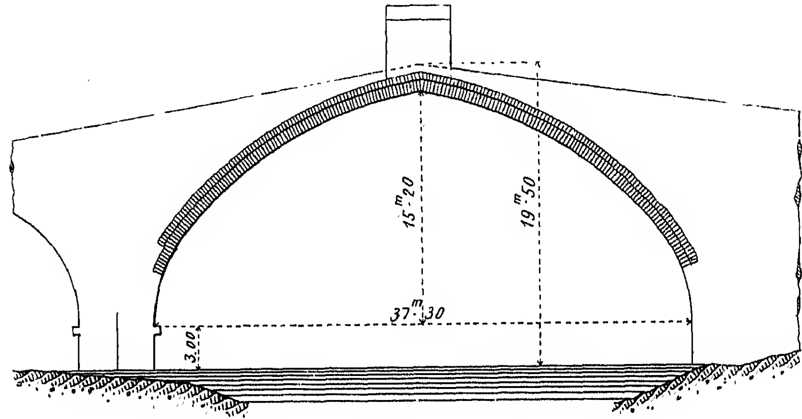
18. — Station du chemin de fer de Barcelone à Tarragone.

19. Ce que j'ai vu — septembre 1907.

20. gracieusement relevées sur ma demande, fin 1907, par M. Ortega, Ingénieur des Ponts et Chaussées à la Direction des Travaux Publics de la Province de Barcelone.

L'ouvrage a été restauré en 1768[21].

f_1 — Grande arche, - aval — 2^{mm}



Une inscription de 1768, dans la chapelle de la clef, l'attribue à Annibal[21].

La forme et l'appareil de l'ouvrage ne permettent pas de l'admettre ; l'Histoire non plus[22].

21. — « *Por los años de 535 de la fundación de Roma fué construído este admirable puente por el* « *grande Anibal Capitán Cartaginés, é hizo erigir el Arco Triunfal que aun existe á su salida, en honor* « *de su padre Amilcar. Despues de 1985 años de duración, se hallara esta Fábrica muy mal tratada y en* « *estado de arruinarse enteramente; Pero á fin de conservar un Monumento de tan rara antigüedad lo* « *mandó restablecer en este año de 1768 la Magestad del Señor Don Carlos III Rey de España,...* »

Texte qu'a bien voulu collationner, en 1913, M. l'Alcalde de Martorell.

22. — En effet, d'après l'inscription[21], ce pont aurait été construit 1985—1768=217 ans avant J.-C. (L'inscription admet que la fondation de Rome est en l'an 535+217=752 avant J.-C. — Duruy (« *Histoire des Romains* », vol. 1, p. 7) adopte 754.

En 227, Asdrubal, gendre d'Amilcar, a conquis l'Espagne jusqu'à l'Ebre où les Romains l'arrêtent par un traité. En 221-220, Annibal, qui lui succéda dans le commandement des armées puniques, achève la soumission de l'Espagne jusqu'à l'Ebre.

En 219, il se jette sur Sagonte et l'emporte. Au printemps de 218, il part de Carthagène ; cinq mois après, il est à Turin (Duruy : « *Histoire des Romains* », volume 1 ; — Polybe : « *Histoire générale* », livres II et III).

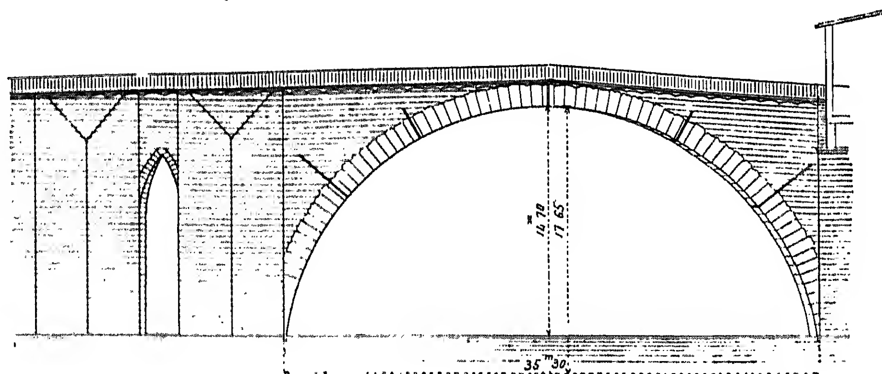
Ainsi, Annibal n'a pu traverser l'Ebre (lequel est encore à 40 lieues au sud de Martorell) avant 219, à cause du traité d'Asdrubal ; — ni en 219, à cause du siège de la grande ville de Sagonte qu'il n'emporte qu'après huit mois d'une résistance furieuse, ce qui ne lui a pas permis de distraire une partie de ses forces pour aller, en pays ennemi, où les Romains avaient déjà pris pied, à 80 lieues de Sagonte, faire construire un pont qui a demandé beaucoup plus d'une année et dont il n'avait que faire, puisque le Llobregat est presque partout guéable. En 218 seulement, il franchit l'Ebre, mais pour suivre à marches forcées la route d'Italie. Le pont qu'on lui attribue, étroit et à très fortes pentes, ne permettait pas le passage de sa cavalerie et, encore moins, de ses éléphants.

Après 218, il ne revint plus en Espagne, que fermaient aux armées puniques les victoires des Scipions.

4. — PONT DE VILLENEUVE D'AGEN, SUR LE LOT *(LOT-ET-GARONNE)*

Route Nationale nº 21 de Paris à Barèges

f₁ — Grande arche, - amont — 2mm



Toni Fontenay le donne comme construit en 1732, avec une voûte en plein cintre de 40m43[23].

La grande arche a exactement 35m30[24].

Elle a été construite par Richelieu, en 1642-1643, à la place de deux arches du pont anglais de la fin du XIIIe siècle, emportées en 1636[25].

23. — Toni Fontenay, « *Construction de Viaducs, Ponts-aqueducs, Ponts et Ponceaux en maçonnerie* », Paris, 1852. — Statistique, p. 278, 279, nº 142.

24. — Renseignement gracieusement donné par M. Thérel, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées à Agen (Relevés faits en 1852).

25. — Fernand Cassany de Mazet : « *Histoire de Villeneuve-sur-Lot* », (Bibliothèque Nationale, L⁷k 10430 -- A).

III. *B.* — PONTS RUINÉS

1. — PONT SUR LA NÉRA, PRÈS DE NARNI[1] *(ITALIE, - Ombrie)*

Il a été construit par Auguste sur la voie Flaminienne.

Gauthey décrit un viaduc sur la Néra, près de Terni, à 17 arches de 40^{m} en plein cintre, sur piles hautes de 34^{m}[2].

C'était un pont à 4 arches de $20^{m}50$[3], $34^{m}75$, $15^{m}75$, $15^{m}75$, ouvertures mesurées sur les dessins de M. Choisy[4].

Les deux naissances de la grande arche sont à des niveaux différents.

« *L'arche rampante de Narni demeure une des plus remarquables conceptions* « *de l'architecture antique*[4] ».

Ç'a été peut-être la plus grande voûte romaine[5].

L'ouvrage a péri parce qu'il était mal fondé[4].

---

2. — PONT DE TRAJAN, SUR LE DANUBE[6] *(HONGRIE)*

D'après Perronet, « *le pont construit à Worhel, sur le Danube, en Hongrie,* « *par Trajan, d'après les dessins d'Apollodore de Damas, était composé de* « *20 arches; chacune de 170 pieds d'ouverture en plein cintre* ($55^{m}22$)[7]... »

Ces assertions sont empruntées en partie à Dion Cassius (Epit., lib. LXVIII-13).

1. — à environ 100^{k} à l'Est de Rome, sur la route d'Ancône.

2. — « *Construction des Ponts* », - Tome I, p. 20, Pl. IV, fig. 68, — Paris 1809.

3. — Arche restaurée. — La route d'Ancône passe dessous.

4. — « *L'Art de bâtir chez les Romains* », p. 139, 140, Pl. XXI, Paris 1873.
La Pl. XXI est reproduite dans la « *Construction des Ponts* » de Croizette-Desnoyers, Tome I, p. 12, et dans les « *Ponts en maçonnerie* » de MM. Degrand et Résal, Tome II, p. 38.

5. — Viendraient ensuite les deux pleins cintres de 28^{m} et 30^{m} du pont d'Alcantara sur le Tage, province de Cacérès, - construit par Trajan en 98. (Croizette-Desnoyers, « *Construction des Ponts* », Tome I, p. 16).

6. — à 21^{k} en aval d'Orsova. Rapport de M. Lalanne, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées, Président de la Commission technique pour la construction d'un pont sur le Bas Danube, 30 décembre 1879. (Annales des Ponts et Chaussées 1880, 2ᵉ sem. p. 267 à 296.

7. — « *Mémoire sur les moyens de construire de grandes arches de pierre de 200, 300, 400 et jusqu'à* « *500 pieds d'ouverture* », - Art. 105 », — Paris, 1793.

D'après la même source, Gauthey en a établi un dessin. Il spécifie : « *les* « *pierres qui servirent à construire ce pont étaient énormes*[8] ».

Or, d'après un bas-relief de la Colonne Trajane donnant une vue, d'ailleurs, « *toute conventionnelle* »[9], et d'après une médaille de la Bibliothèque Nationale[10], le pont était en charpente, à 3 cours d'arcs[11, 12].

Il avait 21 travées de près de 36m [6].

---

3. — PONT DE JUSTINIEN, SUR LE FLEUVE SANGARIS *(ASIE-MINEURE)*

Perronet cite : « *L'arche de 200 pieds* (64m97) *d'ouverture en plein cintre* « *construite par Justinien sur le fleuve Sangaris dans l'Asie-Mineure*[13]... »

Or, le pont de Justinien, près d'Ada-Bazar, est composé de huit arches de 23m au plus, et il n'y a pas en Asie-Mineure d'autre arche antique de grande portée[14].

Ce pont n'est d'ailleurs pas sur le Sakaria (ancien Sangaris), mais sur un affluent, le Tchark-Son.

Il existe, en un point du Sakaria, en amont du confluent avec le Tchark-Son, sur chaque rive, des vestiges d'ancienne maçonnerie. Le Sakaria, très encaissé en ce point, y a de 60 à 70m de largeur ; mais il n'existe aucune trace de route ayant jamais pu y aboutir[15], et il n'est pas vraisemblable que ces ruines soient d'anciennes culées[16].

8. — Gauthey, « *Construction des Ponts* », Tome I, p. 20, Pl. IV, fig. 69.

9. — M. Choisy : « *Art de bâtir chez les Romains* », p. 161, 162.

10. — Reproduites par Duruy : « *Histoire des Romains* », Tome IV, p. 753.

11. — Voir aussi « *La Colonne Trajane d'après le surmoulage exécuté à Rome en 1861 et 1862* » par W. Froehner, Conservateur du Louvre, — Paris, Rotschild, 1871.

12. — M. Choisy en a essayé une restitution. — « *Histoire de l'Architecture* ». Paris. Gauthier-Villars, 1899. Tome I, p. 533.

13. — « *Mémoire sur la recherche des moyens de construire de grandes arches de pierre de 200, 300,* « *400 et jusqu'à 500 pieds d'ouverture* », Art. 106, — Paris, 1793.

14. — Renseignements qu'avait bien voulu me fournir M. Galland, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, Directeur au Ministère des Travaux Publics à Constantinople.
On trouve un croquis et une description assez complète du pont de Justinien dans l'ouvrage de Charles Texier sur l'Asie-Mineure.

15. — Renseignements fournis par l'Ingénieur résidant à Ada-Bazar, communiqués par M. Sellié, Ingénieur de la Compagnie des Eaux de Constantinople.

16. — Renseignements qu'a bien voulu prendre récemment au Ministère des Travaux Publics de Turquie, M. Louis Godard, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées.

III. *C.* — PONTS QUI N'ONT JAMAIS EXISTÉ [1]

1. — PONT DE MARBRE, SUR L'ARNO, A FLORENCE *(ITALIE)*

Gauthey en donne un dessin [2], et le décrit ainsi :

« *Ce pont, bâti par Michel-Ange, est composé d'une seule arche en arc de*
« *cercle, de 12m23 d'ouverture et de 9m1 de flèche... La voûte n'a que 1m62*
« *d'épaisseur à la clef, et la corniche a été taillée dans les voussoirs, après l'affais-*
« *sement de l'arche. Le parapet du pont est formé par des balustres ; cet ouvrage*
« *est d'une telle délicatesse, qu'à une grande distance, l'épaisseur à la clef disparaît*
« *à la vue...* »

Ce pont n'existe pas.

1. — On a cité, comme en maçonnerie, le Pont de Vauxhall, sur la Tamise, à Londres : il est en acier.

2. — « *Construction des Ponts* », Paris, 1809, Tome I, p. 23, Pl. I, fig. 17.

LIVRE II

CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE SPÉCIAL AUX VOÛTES INARTICULÉES

TITRE I

COMMENT ON TRACE UNE VOÛTE

CHAPITRE I

PREMIÈRES INDICATIONS

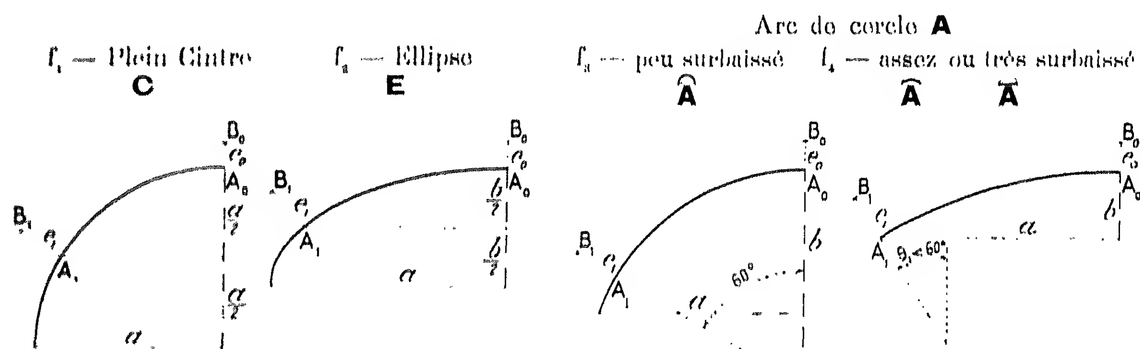
L'intrados adopté, on a, par des formules empiriques, — c'est-à-dire par comparaison avec les voûtes faites, — d'après sa forme, sa portée, sa montée, l'épaisseur à la clef e_0, l'épaisseur e_1 en un autre point.

Cet autre point est :

le milieu de la montée pour les pleins cintres et les ellipses (f_1, f_2) ;

à 60° de la clef, pour les arcs peu surbaisssés $\widehat{\mathbf{A}}$ (f_3) ;

la naissance, pour les autres $\widehat{\mathbf{A}}$, $\overline{\mathbf{A}}$ (f_4).



Ces deux points B_0 B_1 de l'extrados, on les réunit par une courbe qui sera presque toujours un arc de cercle.

On a ainsi, tout de suite, une voûte qui tient.

Cela suffit pour les voûtes courantes.

Mais les grandes, les très surbaissées, celles qu'on veut faire minces, sont tracées d'après leurs charges, leurs surcharges, et même, les variations de température, le vent, le freinage,... de façon à encadrer au mieux les courbes de pression.

Pour l'intrados, on ne s'en tient plus aux courbes usuelles : plein cintre, ellipse, arc de cercle ; on les déforme, on les cambre.

Peu importe que l'équation de la courbe soit simple ou compliquée ; avec un tableau d'abscisses et d'ordonnées, elle s'exécute très facilement.

Dans une voûte mieux tracée, on utilise mieux les matériaux ; on réduit l'épaisseur et, avec elle, le poids et la poussée des voûtes, c'est-à-dire les piles et les culées.

CHAPITRE II

COURBES D'INTRADOS

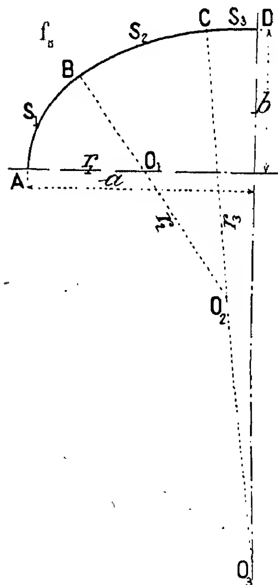
§ 1. — *PLEIN CINTRE* **C**

Le plein cintre est la courbe la plus simple, la plus facile à tracer, à calculer, à exécuter ; la plus connue des entrepreneurs, des charpentiers, des appareilleurs ; celle de la plupart des voûtes romaines (ponts, aqueducs, portes de ville, arcs de triomphe, amphithéâtres,...)[1], des berceaux romans, des arcades de la Renaissance, de presque tous nos ouvrages courants, nos viaducs,...

§ 2. — *COURBES ELLIPTIQUES SURBAISSÉES* **E**

Art. 1. — Anse de panier.

A. - Définition. — Une anse ABCD (f_0) est faite d'une suite d'arcs de cercle S_1, S_2,... tangents entre eux, décrits avec des rayons r_1, r_2,... croissant des naissances à la clef.



Elle est à 3, 5,... ($2n$–1) centres.

On prend les rayons des naissances et de clef assez grands pour envelopper l'ellipse de mêmes sommets[2].

Pour les courbes peu surbaissées, $\frac{1}{2,5}$, $\frac{1}{3}$, on s'est souvent contenté de 3 centres. Au 1/4, les deux rayons seraient trop différents, les changements de courbure choquants : on augmente le nombre de centres : il y en a 11 au pont de Neuilly.

B. - Tracés d'anses de panier.

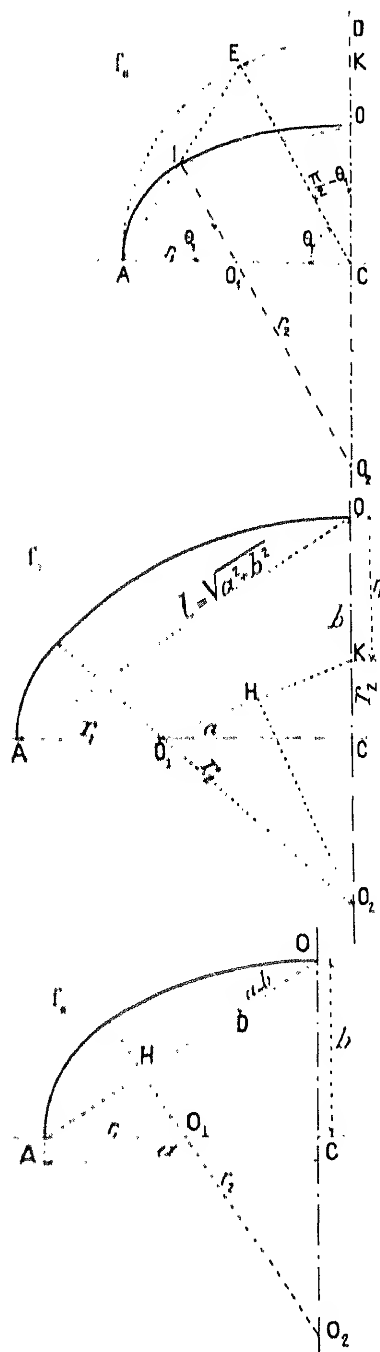
B_1. - *à 3 centres.* — Bien qu'en pratique on leur doive préférer l'ellipse, j'indique quelques tracés d'anses de panier pour le cas où on en aurait à réparer ou à refaire.

1° - On se donne le 1er angle θ_1 (f_0). — Décrire le 1/4 de circonférence AD. — Tirer les cordes DE, EA. — Mener OI parallèle à DE, puis IO_2 parallèle à CE.

O_1, O_2 sont les centres cherchés.

1. — Les Romains l'ont peut être appris des Étrusques (Choisy : « *Histoire de l'Architecture* », I, p. 247, 513, 539, 587.

2. — Dans le cas de 3 centres, on vérifie facilement que pour avoir $r_2 > \frac{a^2}{b}$, il faut avoir pris $r_1 > \frac{b}{a} \frac{a+b}{2}$.



Si $\theta_1 = 60°$, c'est l'ovale de Huyghens.

Si θ_1 est tel que $EK = \frac{1}{2} CK$ (c'est-à-dire $\theta_1 = 63°26'$), c'est l'ovale « antique »[3].

L'ovale antique enveloppe l'anse de Huyghens; toutes deux enveloppent l'ellipse de mêmes sommets : aux reins, elles sont plus rondes.

2° – *On se donne le premier rayon* r_1 (Γ_7). — Prendre $OK = r_1$. Joindre O_1K. Élever au milieu H une perpendiculaire à O_1K ; elle donne r_2[4].

Dans le triangle $O_1 O_2 C$, on a :

$$(r_2 - r_1)^2 = (a - r_1)^2 + (r_2 - b)^2$$

D'où :

$$r_2 = \frac{l^2 - 2ar_1}{2(b - r_1)} \qquad \frac{r_2}{r_1} = \frac{l^2 - 2ar_1}{2r_1(b - r_1)}$$

Ce rapport est minimum pour : $r_1 = \frac{l}{2a}\left[l - (a - b)\right]$

On a alors :

$$r_2 = \frac{al}{l - (a - b)}\ ^{4}.$$

Voici, pour avoir r_1, r_2, le tracé indiqué par Bossut[5] (Γ_8) : il a été fort appliqué.

Sur la corde $OA = l$, prendre $OD = a - b$.

Alors $AD = l - (a - b)$.

Sur le milieu H de AD, lui élever une perpendiculaire : elle donne les deux centres O_1, O_2[5].

3. — Mornadière, p. 173, Pl. 34, fig. 3.

On aurait aussi courbé des ressorts d'une machine de guerre (Notice et extraits des Manuscrits de la Bibliothèque nationale... publiés par l'Institut National de France... (Tome 26e, Paris, Imprimerie nationale, MDCCCLXXVII, 2e Partie : « *La Chirobaliste d'Héron d'Alexandrie* », par Victor Prou, Ingénieur civil, p. 154, 155 et 156).

4. $O_2K = O_2O_1 = r_2 - r_1 = \frac{(a - r_1)^2 + (b - r_1)^2}{2(b - r_1)}$ (triangles semblables O_2HK, O_1KC)

Le minimum de $r_2 - r_1$ est pour $r_1 = b - \frac{1}{\sqrt{2}}\left(a - b\right)$

L'anse ainsi tracée est désagréable.

5. — Pour le minimum de $\frac{r_2}{r_1}$, il faut en effet : $r_1 = \frac{OA \times AD}{2\ AC}$.

Or, c'est ce que donnent les triangles semblables AHO_1, AOC.

Cours de Mathématiques, 3e Partie : « *Traité élémentaire de géométrie et de la manière d'appliquer l'algèbre à la géométrie* », par M. l'abbé Bossut, de l'Académie Royale des Sciences,... Paris, Claude Antoine Jombert, Fils Aîné, M.DCC.LXXVII. Page 491 : « *De la meilleure figure des voûtes cintrées en anse de panier à trois centres.* »

B_2. – *à plus de 3 centres.* — Pour $2n$–1 centres, n rayons, Michal a généralisé [6] la méthode de Huyghens.

Ses anses ont les angles aux centres égaux, soit pour $2n - 1$ centres :

$$\theta = \frac{180^0}{2n-1}.$$

Les données sont a, b, $2n-1$, d'où θ.

Sur les n rayons, $n-2$ sont arbitraires : Michal les a calculés pour que l'anse de panier se rapprochât le plus possible de l'ellipse de mêmes axes [7, 8].

Voici ses tables :

Surbaissement $\sigma = \frac{b}{2a}$	Anse de panier à : 5 centres 3 rayons	7 centres 4 rayons		9 centres 5 rayons.		
	$\frac{r_1}{a}$	$\frac{r_1}{a}$	$\frac{r_2}{a}$	$\frac{r_1}{a}$	$\frac{r_2}{a}$	$\frac{r_3}{a}$
0,20	Angle aux centres : $\frac{180^o}{5} = 36^o$	Angle aux centres : $\frac{180^o}{7} = 25^o\,42'\,51''$		0,166	0,228	0,443
0,21				0,185	0,251	0,474
0,22				0,203	0,276	0,504
0,23				0,222	0,296	0,535
0,24				0,240	0,318	0,556
0,25		0,265	0,419	0,259	0,341	0,597
0,26		0,289	0,445	Angle aux centres : $\frac{180^o}{9} = 20^o$		
0,27		0,312	0,472			
0,28		0,336	0,498			
0,29		0,359	0,525			
0,30	0,396	0,383	0,551			
0,31	0,423	0,406	0,578			
0,32	0,450	0,431	0,604			
0,33	0,477	0,455	0,630			
0,34	0,504					
0,35	0,530					
0,36	0,556					

Emploi des tables de Michal. — *Tracer une anse à 7 centres,* pour $a = 15^m$, $b = 7^m50$ ($\sigma = 0,25$) (f_0).

$\frac{r_1}{a} = 0,265$, d'où $r_1 = 3^m990$.

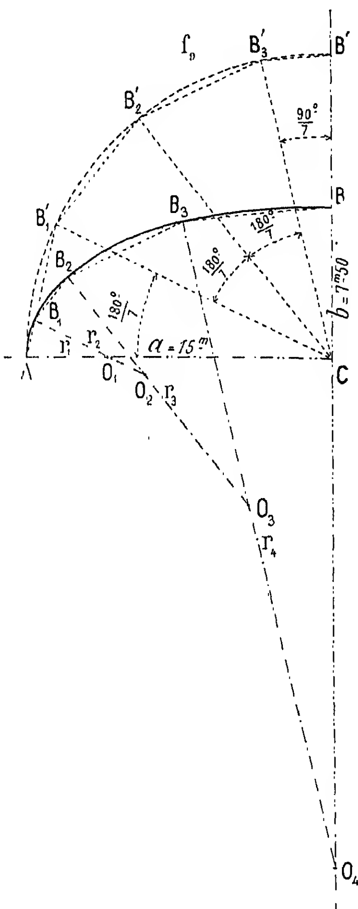
$\frac{r_2}{a} = 0,419$, d'où $r_2 = 6^m30$.

6. — Annales des Ponts et Chaussées, 1831, 2e semestre, Tome II, p. 49 : « *Notice sur les courbes en « anse de panier employées dans la construction des ponts.* »

7. — « *Dans cette intention nous adopterons pour longueur de chacun de ces rayons le rayon de « courbure qui, dans l'ellipse correspondante à l'anse de panier à tracer, partagerait en deux parties « égales chacun des arcs de l'anse de panier.* » (Id., p. 52 et 53).

8. — Lerouge (Annales des Ponts et Chaussées, 1839, 2e semestre, Tome II, p. 335) a cherché, lui aussi, à construire des anses très voisines de l'ellipse ; ses rayons croissent en progression arithmétique ; il trouve un nombre excessif de centres (déjà 15, pour σ=0,31).

Les méthodes Michal et Lerouge ont été résumées dans leur Cours de Ponts : par Morandière p. 172 à 178 (Paris, Dunod, 1874) ; par Croizette-Desnoyers, Tome I, p. 395 à 401 (Paris, Dunod, 1885).



Avec r_1, on place O_1 sur A C ; on décrit l'arc $A B_1$ de 25°42'51".

$O_1 B_1$ est parallèle à $C B'_1$.

Avec r_2, on place O_2 sur $B_1 O_1$; on décrit l'arc $B_1 B_2$ de 25°42'51".

$O_2 B_2$ est parallèle à $C B'_2$, et $B_1 B_2$ à $B'_1 B'_2$.

Puis, comme pour l'anse à 3 centres, on tire $B_2 B_3$ parallèle à $B'_2 B'_3$, BB_3 parallèle à $B' B'_3$.

On mène par B_3 une parallèle à B'_3 C ; elle donne O_3, O_4.

C. - Emploi. — On a fait autrefois grand usage de l'anse de panier[9], parce que l'on considérait comme fort avantageux de tracer l'intrados avec le compas.

Or, on ne trace au compas que le dessin sur le papier. C'est par abscisses et ordonnées que, sauf pour les tout petits ouvrages, on trace l'intrados en vraie grandeur.

Les anses de panier ont, presque toujours, des jarrets ou une brisure aux changements de rayons.

On n'en fait presque plus.

Art. 2. — Ellipse.

— Ce n'est guère qu'au XIXe siècle[10], qu'on

9. — On a dit que les voûtes du pont de Toulouse (1543-1632 ?) sont les premières de France en anse de panier.

Au XVIIIe siècle, on a fort employé les anses, très souvent à 3 centres : Ponts de Vizille, Lavaur, Gignac (Tome I, p. 93, 97, 103) ; Ponts de Blois (1716-1724), d'Orléans (1750-1760), de Moulins (1756-1764), de Saumur (1756-1770)....

Dans la 2e moitié du XVIIIe, Perronet a tracé avec 11 centres les arches des Ponts de Mantes (1757-1765), de Nogent (1766-1769), de Neuilly (1766-1774). Celles de Tours (1764-1777) ont aussi 11 centres. Sauf Neuilly, surbaissé au 1/4, les autres ne le sont qu'au 1/3, ou très peu plus.

On trouve encore quelques anses de panier dans la 2e moitié du XIXe siècle, et même après. On a décrit, Tome I : les ponts Annibal (1868-1870) (p. 112) et du Diable (1871-1872) (p. 116), 5 centres ; le pont de Signac (1871-1872), 19(!) centres (p. 131) ; le pont de l'Avenue Edmondson à Baltimore(1908-1909), 3 centres (p. 122), le pont de l'Empereur François à Prague (1898-1901), 7 centres. (p. 168).

10. — Dupuit croit que c'est par ignorance que les anciens constructeurs préféraient l'anse de panier (« *Equilibre des voûtes* », Paris Dunod, 1870, p. 214).

Mais, bien avant le XIXe siècle, on connaissait « l'ovale du jardinier » ; on savait la tracer à l'aide d'un cordeau attaché à ses deux foyers.

Belidor l'indique pour tracer un intrados (« *Architecture hydraulique* », - 2e Partie, Tome II, Livre IV, Chapitre XI, p. 443 ; Paris M.DCC.LXXXX).

J'ai décrit, Tome I, les ponts anglais en ellipse de Gloucester (1826-1827) p. 107, de Londres (1824-1831) p. 147.

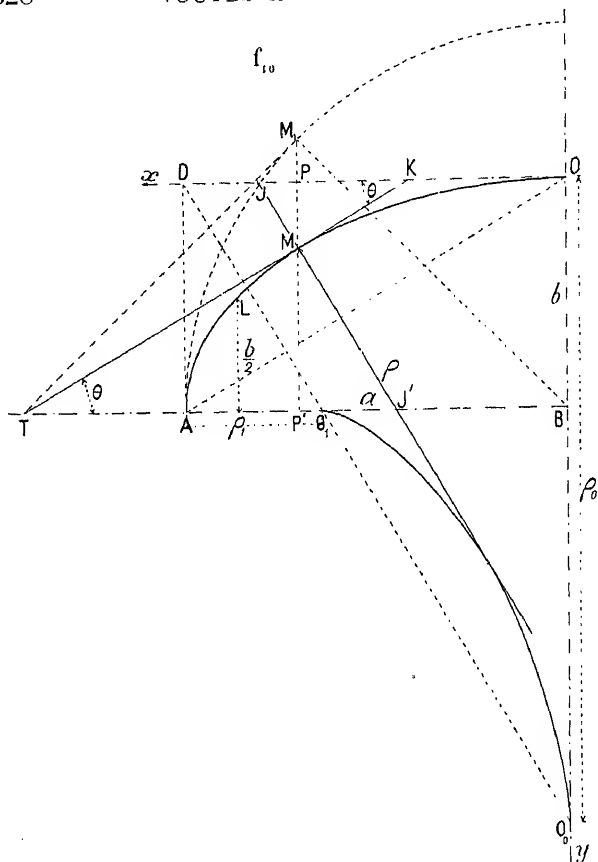
Le pont de Waterloo à Londres (1816-1818) était encore en anse de panier.

En France, ce n'est que dans la 2e moitié du XIXe qu'on commence à employer couramment l'ellipse.

A Paris : Pont de l'Alma (1854-1855) (Tome I, p. 153) ; Pont au Change (1859-1860) ; Pont Louis-Philippe (1860-1862) ; Pont de Bercy (1863-1864).

Sous chemin de fer : Ponts de Chalonnes et de Nantes (1863-1866).

Les premiers grands ponts de chemin de fer (Ponts de Cinq-Mars, 1846-1847, de Port-de-Piles, 1846-1848 ; — les ponts de Morandière : Montlouis, 1843-1845, Plessis-lez-Tours, 1855-1857) étaient encore en anse de panier.



s'est enfin avisé qu'au lieu de construire, assez péniblement, des anses de panier se rapprochant de l'ellipse, il était bien plus simple de calculer les ordonnées d'une ellipse [11].

On a :

Equation (Γ_{10}) :

$$y = b\left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}\right)$$

Tangente

- Inclinaison de la tangente sur ox, ou de la normale sur oy. $\quad \text{Tang}\ \theta = \frac{b}{a^2}\,\frac{x}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}} = \frac{b^2}{a^2}\cdot\frac{x}{b - y}.$
- Sous-tangente PK : $S_t = \frac{a^2 y}{b^2 x}(b - y)$.

On a de suite la tangente en menant TM_1 tangente en M_1, dont M est la projection, et tirant TM.

Normale

- Sous-normale $\quad PJ = \frac{b^2}{a^2}\,\frac{xy}{b - y}.$
- $P'J' = \frac{b^2}{a^2}x$. — Elle est proportionnelle à l'abscisse.

On construit, ou on calcule ainsi très facilement les normales.

Milieu de la montée $y' = \frac{b}{2}$

- Abscisse : $x' = \frac{a\sqrt{3}}{2}$.
- Tang $\theta' = \frac{b}{a}\sqrt{3} = 2\sigma\sqrt{3}$.
- Sous-normale $= \frac{b^2\sqrt{3}}{2a} = 2a\sigma^2\sqrt{3}$.

Point pour lequel la normale est à 60° sur la verticale :

$$x = \frac{a^2\sqrt{3}}{\sqrt{3a^2 + b^2}} \qquad\qquad y = b\left[1 - \frac{b}{\sqrt{3a^2 + b^2}}\right]$$

11. — Au Tome V, APPENDICE, on trouvera, dans un extrait des tables de Legendre, le développement des arcs OA et OL.

Rayon de courbure :

en M : $\rho = \frac{a^2}{b}\left\{1 - \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)\frac{x^2}{a^2}\right\}^{\frac{3}{2}}$

en O : $\rho_0 = \frac{a^2}{b}$

en A : $\rho_1 = \frac{b^2}{a}$

Traçons le rectangle ODAB, sa diagonale OA : sur la perpendiculaire à OA menée par D sont les centres de courbure O_1 ($O_1A = \rho_1$) et O_0 ($O_0O = \rho_0$).

en L (milieu de la montée) : $\rho_1 = \frac{(a^2 + 3b^2)^{\frac{3}{2}}}{8ab}$

L'enveloppe des normales à l'intrados (sa développée) rapportée à BA, BO est :

$$(aX)^{\frac{2}{3}} + (bY)^{\frac{2}{3}} = (a^2 - b^2)^{\frac{2}{3}}$$

Elle peut servir à tracer rapidement sur le papier les joints des bandeaux.

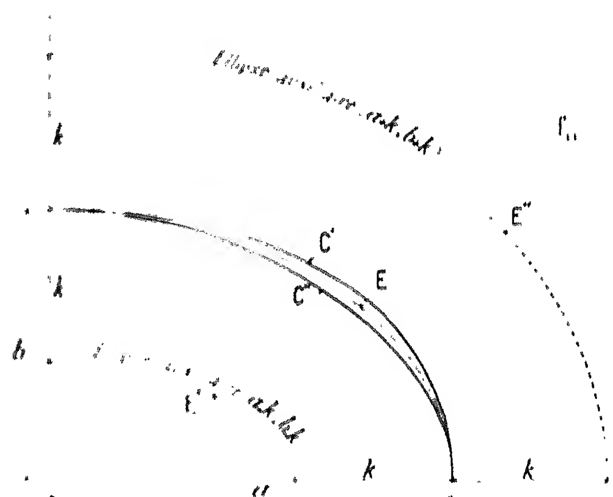
L'ellipse est très gracieuse, surbaissée à plus de 1/3,5, à moins de 1/5.

Le rayon de courbure au sommet, $\rho_0 = \frac{a}{2\sigma}$, augmente vite avec le surbaissement : une ellipse de 40ᵐ au 1/6 a le cerveau d'un plein cintre de 120ᵐ.

Perronet lui a reproché, — à tort, — d'avoir un trop petit rayon de courbure aux naissances $\frac{b^2}{a}$, et d'être difficile à exécuter[12].

Art. 3. — Courbe parallèle à une ellipse. — Soit (f_0) une ellipse E (a, b).

Considérons deux ellipses auxiliaires E' ($a - k$, $b - k$), E'' ($a + k$, $b + k$) et traçons, à une distance k, la courbe C' parallèle extérieure à E', la courbe C'' parallèle intérieure à E''[13].



E, C', C'' ont les mêmes sommets.

C'' est intérieure à E ; C', extérieure.

Leurs rayons de courbure sont :

pour C', ceux de E' augmentés de k ;

pour C'', ceux de E'' diminués de k :

donc	à la clef	aux naissances	
pour C'	$\frac{(a - k)^2}{b - k} + k$	$\frac{(b - k)^2}{a - k} + k$	plus grands que ceux de E.
pour C''	$\frac{(a + k)^2}{b + k} - k$	$\frac{(b + k)^2}{a + k} - k$	plus petits que ceux de E.

12. « ...... chaque petite portion de l'ellipse étant d'une courbure différente, son exécution était trop difficile et assujettissante pour les Ouvriers ; et les parties de la voûte elliptique les plus proches des naissances ne s'élevant pas assez à proportion de la clef, opposoient encore trop d'obstacle au cours de l'eau dans le temps des crues...... » (Perronet : « Description des projets et de la construction des Ponts de Neuilly, de Mantes,...... » Tome I, p. 55, Paris, Imprimerie Royale, M.DCCLXXXII.)
Perronet, à Neuilly, n'a pourtant pas craint les tracés compliqués.

13. Une ellipse et toutes ses parallèles ont même développée : on les peut tracer en déroulant un fil enroulé sur cette développée.

On construit facilement C'C" en ajoutant ou retranchant k aux normales aux ellipses E', E" : il est assez laborieux de les calculer [14].

On ne se sert pas assez de ces courbes : elles sont agréables ; — le rayon de courbure y croît continuement à partir de la clef ; — elles n'ont pas de faux sommets.

Art. 4. — Ellipse déformée, en ajoutant à ses ordonnées, ou en en retranchant, la différence n entre celles d'un arc et d'une ellipse auxiliaires.

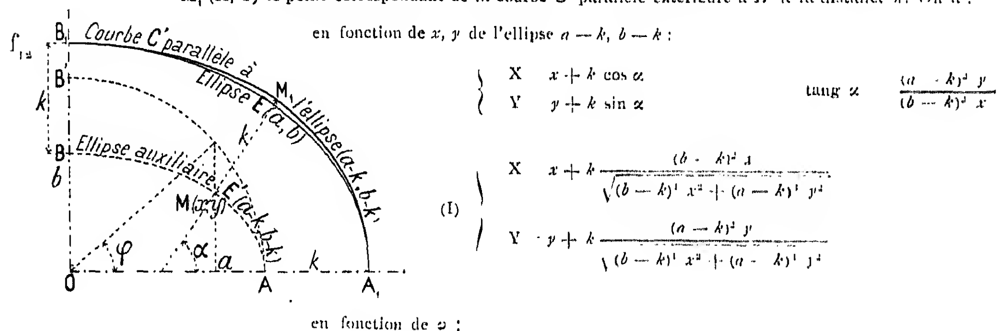
A. - en ajoutant n (Courbes intérieures à l'ellipse). — Dans la monographie du pont des Amidonniers, j'ai indiqué (Tome I, p. 194) comment on peut tracer graphiquement et calculer un intrados de mêmes sommets qu'une ellipse a, b, mais intérieur à elle, en ajoutant à l'ordonnée PM d'un arc de cercle de portée $2a$, de flèche $b-p$, l'ordonnée KN d'une ellipse a, p (f_{13}).

14. — Equation de C', extérieure à l'ellipse E.

Soient (f_{12}) : M (x, y) un point de l'ellipse auxiliaire E' $(a-k,\ b-k)$:

$$\frac{x^2}{(a-k)^2} + \frac{y^2}{(b-k)^2} = 1$$

M_1 (X, Y) le point correspondant de la courbe C' parallèle extérieure à E' à la distance k. On a :



en fonction de x, y de l'ellipse $a-k,\ b-k$:

$$\begin{cases} X = x + k\cos\alpha \\ Y = y + k\sin\alpha \end{cases} \qquad \operatorname{tang}\alpha = \frac{(a-k)^2\, y}{(b-k)^2\, x}$$

$$(I)\quad \begin{cases} X = x + k\,\dfrac{(b-k)^2\, x}{\sqrt{(b-k)^4 x^2 + (a-k)^4 y^2}} \\[2ex] Y = y + k\,\dfrac{(a-k)^2\, y}{\sqrt{(b-k)^4 x^2 + (a-k)^4 y^2}} \end{cases}$$

en fonction de φ :

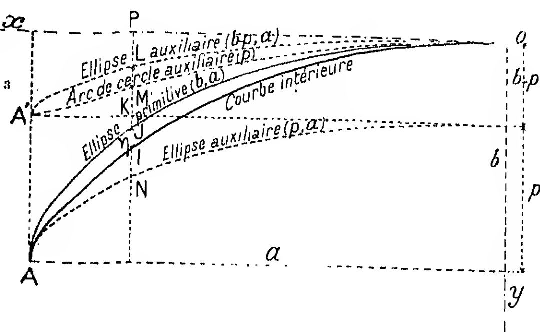
$$\begin{cases} x = (a-k)\cos\varphi \\ y = (b-k)\sin\varphi \end{cases}$$

$$(II)\quad \begin{cases} X = (a-k)\cos\varphi + k\,\dfrac{(b-k)\cos\varphi}{\sqrt{(b-k)^2\cos^2\varphi + (a-k)^2\sin^2\varphi}} \\[2ex] Y = (b-k)\sin\varphi + k\,\dfrac{(a-k)\sin\varphi}{\sqrt{(b-k)^2\cos^2\varphi + (a-k)^2\sin^2\varphi}} \end{cases}$$

en fonction de $\operatorname{tang}\dfrac{\varphi}{2} = t$:

$$(III)\quad \begin{cases} X = (a-k)\,\dfrac{1-t^2}{1+t^2} + k\,\dfrac{(b-k)(1-t^2)}{\sqrt{(b-k)^2(1-t^2)^2 + 4t^2(a-k)^2}} \\[2ex] Y = (b-k)\,\dfrac{2t}{1+t^2} + k\,\dfrac{(a-k)\,2t}{\sqrt{(b-k)^2(1-t^2)^2 + 4t^2(a-k)^2}} \end{cases}$$

On passe de C' à C" en changeant le signe de k.



$$PI = PM + KN = R\left[1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}\right] + p\left[1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}\right]$$

avec $R = \dfrac{a^2 + (b-p)^2}{2(b-p)}$

L'ordonnée PJ de l'ellipse à déformer OJA augmente de : $IJ = \eta = PI - PJ =$

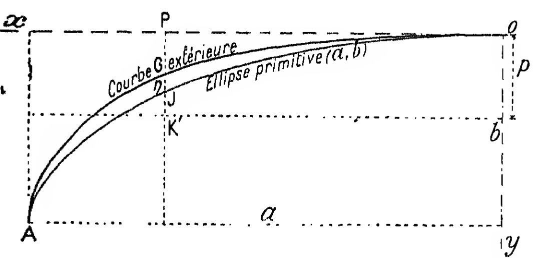
$$= R\left[1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}\right] - (b-p)\left[1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}\right]$$

C'est la différence LM des ordonnées de l'arc OMA' et d'une 2e ellipse auxiliaire OLA' $(a, b-p)$.

En faisant varier p, on peut avoir le rayon de courbure à la naissance de la courbe résultante $\rho_1 = \dfrac{p^2}{a}$ [15] aussi petit, par conséquent la courbe aussi pointue que l'on veut.

On obtient ainsi toutes les courbes intermédiaires intérieures à l'ellipse, depuis l'ellipse a, b pour $p = b$, jusqu'à l'arc de cercle pour $p = 0$.

B.- en retranchant η *(Courbes extérieures à l'ellipse).* — Au lieu d'ajouter à PJ la différence $\eta = JI = LM$ (f_{13}), retranchons-la.



On a (f_{14}) : $PG = PJ - \eta = Y'$

$$= (2b-p)\left[1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}\right] - R\left[1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}\right]$$

Posons (comme Tome I, page 194, renvoi 3) :

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \qquad \gamma = \sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}$$

on trouve :

$$\text{Tang}\,\theta \left(\begin{matrix}\text{inclinaison sur } ox \\ \text{de la tang en G}\end{matrix}\right) = x\left[\frac{2b-p}{a^2\beta} - \frac{1}{R\gamma}\right]$$

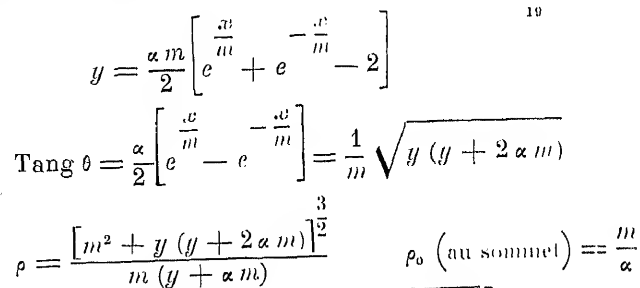
$$\rho \text{ (rayon de courbure en G)} = \frac{\left[\beta^2\gamma^2 + x^2\left\{\dfrac{2b-p}{a^2}\gamma - \dfrac{\beta}{R}\right\}^2\right]^{\frac{3}{2}}}{\dfrac{2b-p}{a^2}\gamma^3 - \dfrac{1}{R}\beta^3}$$

	A la clef $x=0$ $\beta=1$ $\gamma=1$	Aux naissances $x=a$ $\beta=0$
Tang θ	o	∞
Rayon de courbure	$a^2 \dfrac{a^2+(b-p)^2}{p\,a^2+(2b-p)(b-p)^2}$	$\dfrac{(2b-p)^2}{a}$ c'est celui de l'ellipse $(a, 2b-p)$.

Art. 5. — Projection de chaînette. — On l'a déjà vue aux ponts Boucicaut [16] et d'Orléans [17]. On dira plus loin [18] que c'est la courbe d'équilibre d'une voûte infiniment mince, ayant pour ligne de charge une horizontale.

15. — et non $\dfrac{p^2}{R}$, erreur typographique de la page 194 du Tome I, déjà signalée à l'Errata du Tome I.

16. — Tome III, p. 243. 17. — Tome III, p. 255. 18. — Tome III, Livre II, Titre III, Chap. II, § 2, art. 4.



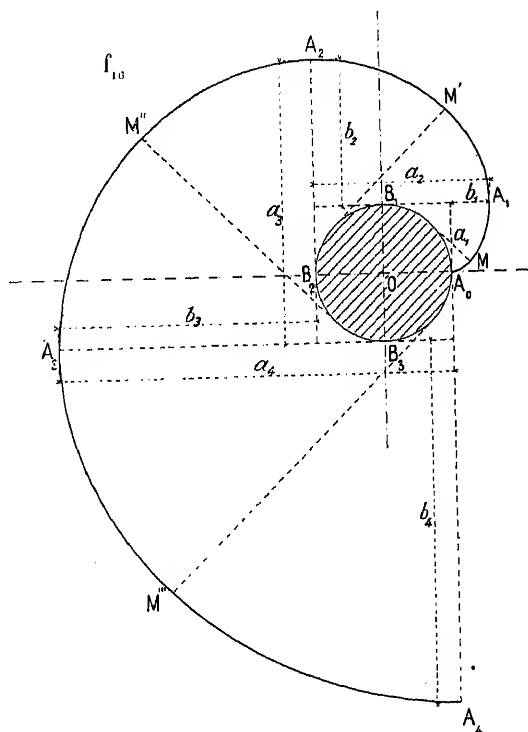
$$y = \frac{\alpha m}{2}\left[e^{\frac{x}{m}} + e^{-\frac{x}{m}} - 2\right]$$ [19]

$$\text{Tang } \theta = \frac{\alpha}{2}\left[e^{\frac{x}{m}} - e^{-\frac{x}{m}}\right] = \frac{1}{m}\sqrt{y\,(y + 2\,\alpha\, m)}$$

$$\rho = \frac{\left[m^2 + y\,(y + 2\,\alpha\, m)\right]^{\frac{3}{2}}}{m\,(y + \alpha\, m)} \qquad \rho_0 \text{ (au sommet)} = \frac{m}{\alpha}$$

ρ diminue du sommet jusqu'au point $y_1 = m\left[-\alpha + \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{1 - \alpha^2}\right]$, puis croît jusqu'à l'$\infty$: pour y_1, il y a un faux sommet ; il est bon pour l'aspect qu'il soit plus bas que les naissances, soit $y_1 > b$. [20]

Art. 6. — Développante de cercle. — Déroulons à partir de A_0 un fil enroulé sur la circonférence O [21] (f_{16}).



A chaque quadrant $A_0 B_1$, $B_1 B_2$,... correspondent des segments de développante $A_0 A_1$, $A_1 A_2$,..... à forme d'ellipse surbaissée, d'abord à 0,285, puis à 0,414,..... [22]

En un point quelconque, le rayon de courbure est l'arc de la circonférence développé. Il est nul en A_0 ; il croît indéfiniment.

Deux tangentes quelconques à angle droit interceptent des arcs M M', M' M'', M'' M''',.. à forme d'ellipse : M variant, on a tous les surbaissements de 0,285 à 0,50.

Ces arcs sont toujours intérieurs à l'ellipse de mêmes sommets : moins de débouché, moins bon aspect.

Il est très facile de tracer la développante, moins de la calculer.

19. — On peut la calculer avec des tables de fonctions hyperboliques (par exemple celles de Houel, Paris, Gauthier-Villars, 1885).

Sin. hyper. de x : $(Sh\,x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$ Cos. hyper. de x : $(Ch\,x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$

20. — Au pont Boucicaut $b = 5^m$; $y_1 = 5^m22$; au pont d'Orléans $b = 5^m80$; $y_1 = 6^m03$.
On n'y voit pas de faux sommet.

21. — Comme toutes les courbes que l'on peut tracer avec un fil, elle doit être fort anciennement connue. Ferroni * l'indique comme ayant été appliquée aux Ponts sur le Sestaion (ou Sestajone), (2 arches de 23m935 de portée, 8m173 de montée), et sur la Lima (Route royale de Pistoie à Modène). *« tous deux « dessinés par l'ex-jésuite Ximénès »* **.

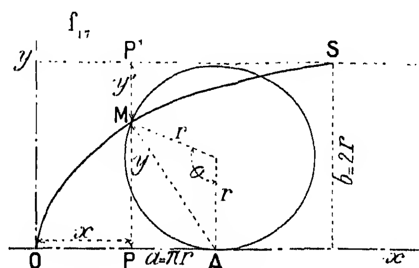
(Mémoire géométrique et historique inséré dans le Tome XIV de la Société italienne des Sciences, 1808 : *« De la véritable « courbe des arches du pont de la Trinité, à Florence »*).

* Ferroni (Pierre), Florentin (1744-1825), professeur de mathématiques à Pise (Grande Encyclopédie).

** Ximénès (Léonard), Italien (1716-1786).

22. — Pour un quadrant d'ordre n, le surbaissement est : $\frac{1}{2} \times \frac{n\pi - 2}{(n-1)\pi + 2}$

Art. 7. — Cycloïde [23, 24] (f_{17}). Projection de cycloïde. — La cycloïde est surbaissée à $\frac{1}{\pi}$: la portée impose la montée.



$$x = r\,(\theta - \sin\theta) \qquad y = r\,(1 - \cos\theta)$$

$$\frac{dy}{dx} = \text{cotang}\,\frac{\theta}{2}$$

M A est normale en M.

L'enveloppe des normales est la même cycloïde, abaissée de $2\,r$, puis déplacée de $\pi\,r$.

$$\rho\ (\text{en M}) = 4\,r\,\sin\frac{\theta}{2} = 2\,\text{MA} \qquad \text{arc SM} = 2\sqrt{2\,r\,y'}$$

Elle est à peine verticale aux naissances ($\rho_0 = 0$) : l'aspect est médiocre [24].

x et y de la cycloïde en fonction de θ (f_{17})

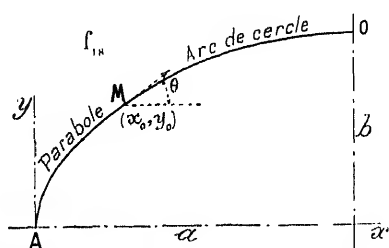
θ en degrés	θ en longueur d'arc de circonférence de rayon 1	$\sin\theta$	$\cos\theta$	$\frac{x}{r} = \theta - \sin\theta$	$\frac{y}{r} = 1 - \cos\theta$
0°	0	0	1	0	0
15°	0,26180	0,25882	0,96593	0,00298	0,03407
30°	0,52360	0,5	0,86603	0,02360	0,13397
45°	0,78540	0,70711	0,70711	0,07829	0,29289
60°	1,04720	0,86603	0,5	0,18117	0,5
75°	1,30900	0,96593	0,25882	0,34307	0,74118
90°	1,57080	1	0	0,57080	1
105°	1,83260	0,96593	0,25882	0,86667	1,25882
120°	2,09440	0,86603	0,5	1,22837	1,5
135°	2,35619	0,70711	0,70711	1,64908	1,70711
150°	2,61799	0,5	0,86603	2,11799	1,86603
165°	2,87979	0,25882	0,96593	2,62097	1,96593
180°	3,14159	0	1	3,14159	2

Multiplions ses ordonnées par $\frac{k}{r}$: $\quad x = r\,(\theta - \sin\theta) \qquad y = k\,(1 - \cos\theta)$

Le surbaissement est $\frac{k}{\pi\,r}$: par k, on en dispose.

Art. 8. — Courbes elliptiques composées de deux courbes.

A. - Arc de cercle au cerveau, parabole aux reins (f_{18}). — L'arc de cercle du cerveau est continué aux reins par une parabole du 3e degré osculatrice [25, 26] : $y^2 = \text{A}\,x + \text{B}\,x^2 + \text{C}\,x^3$



On écrit : qu'elle passe par le point M ; qu'en M, elle a même tangente et même rayon de courbure que le cercle.

Si l'on veut une condition de plus, on ajoute un terme $\text{D}\,x^4$.

Φ_1 – Intrados en cycloïde



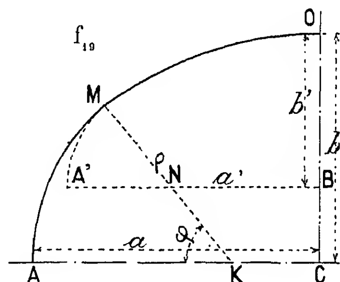
23. — Petit pont en Etrurie sur le torrent Arzana (Ferroni, loc. cit., renvoi 21).

24. — Passage supérieur de Corabeuf (Φ_1) (Ligne d'Epinac à Dijon, 1901-03) ; projet et construction faciles.

25. — Pont de Valence, Tome I, p. 176. — J'avais proposé cette disposition en 1883 pour le pont de St-Waast sur l'Agoût (Ligne de Montauban à Castres, arche de 65m), projet qui n'a pas été approuvé.

26. — Au pont de la Croix sur le Doubs (Ligne de Frasne à Vallorbe) on a pris la parabole : $(y - m\,x)^2 - q\,x = 0$ simplement tangente en M (f_{18}) à l'arc du cerveau : elle y a à peu près même rayon de courbure.

B. - Arc d'ellipse au cerveau, arc de cercle aux reins (f_{19}). — Au pont de Mauzac sur la Dordogne [27], on a prolongé l'ellipse du cerveau O M par un arc de cercle M A osculateur en M, ayant son centre K sur la ligne des naissances.

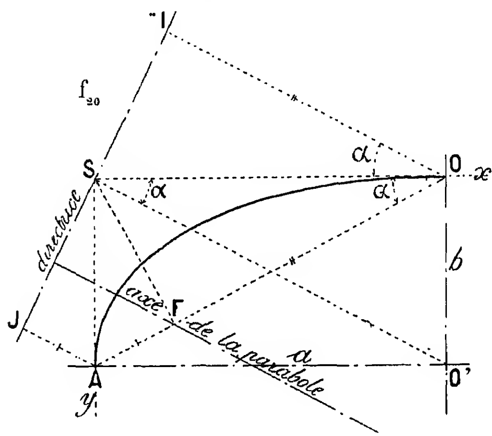


Ce n'est pas à imiter.

Le cercle osculateur, traversant la courbe, donne un jarret au point de tangence.

L'aspect est inférieur à celui de l'ellipse, dont la courbure diminue continuement de la clef aux retombées, le débouché, très peu augmenté.

C. — Deux paraboles tangentes à l'ellipse a, b, *au sommet et aux naissances* (f_{20}).



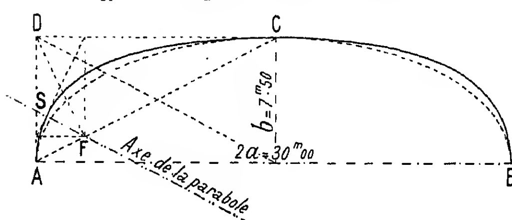
L'équation :

$$\left(\frac{y}{b}-\frac{x}{a}\right)^2-2\left(\frac{y}{b}+\frac{x}{a}\right)+1=0$$

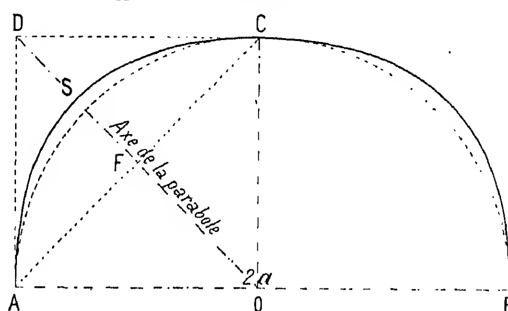
représente une parabole rapportée à Sx et Sy, tangente en O à Sx, en A à Sy [28, 29].

Les deux paraboles symétriques, tangentes en O, font une courbe elliptique qui enveloppe l'ellipse a, b, (f_{21}) le cercle a (f_{22}).

f_{21} — Ellipse au 1/4 cambrée



f_{22} — Plein cintre cambré



27. — Ligne de Bergerac au Buisson (1876-1877).
O M arc d'ellipse d'axes a', b'.
M A arc de cercle de rayon ρ = M K, rayon de courbure en M de l'ellipse a', b'.
Pour les 5 inconnues x, y, φ, a', b', on a les 5 équations :

$$a'^2\,y^2+b'^2\,x^2=a'^2\,b'^2 \qquad \rho=\frac{\left[a'^4-(a'^2-b'^2)\,x^2\right]^{\frac{3}{2}}}{a'^4\,b'} \qquad \operatorname{Tang}\varphi=\frac{a'^2\,y}{b'^2\,x}$$

$$\rho\sin\varphi+b'-y=b \qquad \rho-\rho\cos\varphi+x=a$$

28. — C'est la parabole que l'on obtient en divisant en m parties S O, S A, et joignant.

29. — La droite S O' (de coefficient angulaire $\frac{b}{a}$) est parallèle à l'axe.
La directrice passe par S (angle droit circonscrit), est perpendiculaire à S O'.
Elle est polaire du foyer F. Donc F est sur O A.
J'abaisse S F, perpendiculaire sur O A. — S O I, S O F sont égaux (S O commun, — angles égaux).
Donc O I = O F. F est le foyer.

§ 3. *COURBES ELLIPTIQUES SURHAUSSÉES* E_h [30, 31]

On a construit en anse de panier surhaussée : au XVIIIe siècle, le pont de Ronda (Andalousie) ; en 1846-51, les viaducs sur le Gœltzsch et sur l'Elster (Ligne de Leipzig à Hof)[32] ; tout récemment le pont de Wiesen[33].

C'est la courbe des souterrains à une voie.

Comme pour les voûtes surbaissées, on doit à l'anse de panier préférer l'ellipse, qui est à courbure continue, qui n'a pas de jarrets, et qui, tout compte fait, est d'emploi plus facile.

§ 4. *ARCS SURBAISSÉS* A

Art. 1. — Arc de cercle.

— C'est une courbe très simple, très facile à tracer, à exécuter ; très naturelle, — même plus que le plein cintre, — entre deux berges.

C'est celle de très anciens ponts[34].

On a (f_{11}) :

$$b = 2a\sigma \qquad \text{tang}\,\frac{\theta_1}{2} = \frac{b}{a} = 2\sigma$$

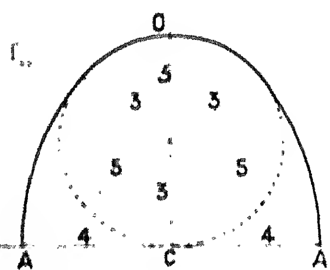
$$R = \frac{a^2 + b^2}{2b} = \frac{a}{\sin\theta_1} = a\,\frac{1 + 4\sigma^2}{4\sigma}$$

Pour un point M : $y = R\left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{R^2}}\right)$

$$x = R\sin\theta$$

$$y = R\,(1 - \cos\theta) = 2\,R\sin^2\frac{\theta}{2}$$

Au Tome V, APPENDICE, on trouvera des tables numériques.



30. — Les ovales surhaussés sont fort anciens. Ont été tracés d'après le triangle égyptien (triangle rectangle 3, 4, 5 $\left(\sigma = \frac{6}{8} = 0{,}75\right)$ (f_{12}) : les berceaux du Ramesseum en Égypte ; plus tard, de Firouz Abad en Perse (Choisy : « *Histoire de l'Architecture* », Tome I, p. 53 et 123).

31. — Le berceau de l'église de Tournus est en anse de panier surhaussée. (id., Tome II, p. 149).

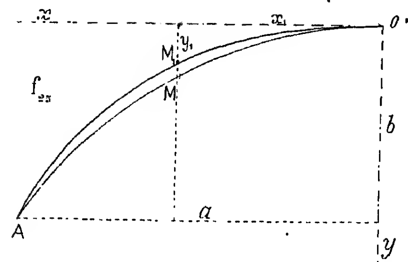
32. — Annales des Ponts et Chaussées, 1853, 1er semestre, p. 241 : Notes recueillies en 1851, pendant sa mission en Allemagne, par M. de Villiers, Ingénieur des Ponts et Chaussées.

Les arches centrales sont en anse de panier surhaussée à 3 centres (id., p. 253).

	Hauteur au-dessus du lit	Arche centrale (Étage supérieur) Portée et rayon aux naissances	Montée	Rayon du cerveau
Viaduc sur le Gœltzsch	80m34	30m87	20m39	14m15
Viaduc sur l'Elster	69m68	30m59	19m50	14m40

33. — Tome I, p. 235.

34. — Sont en arc peu surbaissé : le pont Fabricius, à Rome (An 63 avant J.-C.) (Raynaud : « *Traité d'Architecture. — Edifices* », p. 192, Pl. 69) ; les ponts de Nyons, de Tournon (XIVe siècle) (Tome II, p. 25, p. 34), d'Avignon (XIIe), de la Guillotière (XIIIe), de Pont-Saint-Esprit (XIIIe) (Tome II, p. 25, renvois 3, 4, 5).



Art. 2. — Arc d'ellipse.

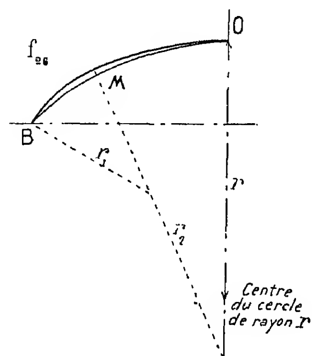
— Proposons-nous de cambrer l'arc de cercle O M A (f_{25}) suivant un arc d'ellipse O M_1 A passant par un point M_1 (x_1, y_1), choisi d'ordinaire vers les 70/100 de la 1/2 portée à partir de la clef.

Pour que l'arc d'ellipse :

$$y = b'\left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{a'^2}}\right)$$

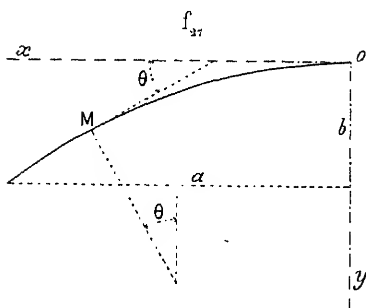
passe par les points M_1 et A, il faut :

$$a' = \frac{b^2 x_1^2 - y_1^2 a^2}{2\sqrt{y_1 b (b - y_1)(b x_1^2 - y_1 a^2)}} \text{ [35]} \qquad b' = \frac{b^2 x_1^2 - y_1^2 a^2}{2 (b x_1^2 - y_1 a^2)}$$



Art. 3. — Arc d'anse de panier.

— On a cambré en anse de panier des arcs O M B (f_{26})[36].



Art. 4. — Arc de la courbe

$$y = b'\left(1 - \sqrt[n]{1 - \frac{x^2}{a'^2}}\right).$$

Elle a 3 paramètres a' b' n[37].

La courbe doit passer par les naissances a, b.

On dispose de deux conditions : par exemple

35. — En prenant, au Pont Boucicaut, Tome III, p. 243, x_1 = 70/100 de la 1/2 portée et l'y_1 de la projection de chaînette adoptée, on trouve : $a' = 24^m219$ $\quad b' = 11^m44$.

L'écart maximum entre les deux courbes est $\pm 31^{mm}$.

Le rayon de courbure à la clef est : pour l'ellipse, 51^m27 ; pour l'intrados adopté, 53^m90 ; pour l'arc de cercle, 42^m50.

36 — Ponts allemands, en arcs très surbaissés, **A** r^{le} ($\geqslant 40^m$), Tome III :

	r_0 Clef	r_1 Naissances
Ziegenhals	60^m	25^m676
Michelau	50^m	26^m637
Schwusen	60^m	40^m
Krappitz	64^m1	41^m90

	r_0 Clef	r_1 Naissances
Mehring...	60^m	31^m95
Schweich..................	60^m	31^m95
Trittenheim	56^m	33^m55

37. — $$\text{Tang } \theta = \frac{2\, b'}{n\, a'^2} \cdot \frac{x}{\left(1 - \frac{x^2}{a'^2}\right)^{1 - \frac{1}{n}}}$$

$$\rho \left(\begin{matrix}\text{Rayon}\\ \text{de courbure}\\ \text{en M}\end{matrix}\right) = \frac{n\, a'^2}{2\, b'} \frac{\left[\left(1 - \frac{x^2}{a'^2}\right)^{2 - \frac{2}{n}} + \frac{4\, b'^2\, x^2}{n^2\, a'^4}\right]^{\frac{3}{2}}}{\left(1 - \frac{x^2}{a'^2}\right)^{1 - \frac{2}{n}} \left|1 + \frac{x^2}{a'^2}\, \frac{n - 2}{n}\right|} \qquad \rho_0 \text{ (au sommet O) } \frac{n\, a'^2}{2\, b'}.$$

deux points, ou un point et le rayon de courbure au sommet[38].

Art. 5. — Parabole $y = Ax^2 + Bx^4 + Cx^6 + \ldots$

Si on prend 3 termes, on trouve :

Conditions :	3 points $(ab,\ x_1 y_1,\ x_2 y_2)$	2 points $(ab,\ x_1 y_1)$ et Rayon de courbure au sommet $\rho_0 = \frac{1}{2A}$
A	$\dfrac{a^2 x_1^2 x_2^2 \left\{ \frac{b}{a^4}\left(x_2^2 - x_1^2\right) + \frac{y_1}{x_1^4}\left(a^2 - x_2^2\right) + \frac{y_2}{x_2^4}\left(x_1^2 - a^2\right) \right\}}{(a^2 - x_1^2)(x_1^2 - x_2^2)(x_2^2 - a^2)}$	$\dfrac{1}{2\rho_0}$
B	$\dfrac{\frac{b}{a^4}\left(x_2^4 - x_1^4\right) + \frac{y_1}{x_1^4}\left(a^4 - x_2^4\right) + \frac{y_2}{x_2^4}\left(x_1^4 - a^4\right)}{(a^2 - x_1^2)(x_1^2 - x_2^2)(x_2^2 - a^2)}$	$\dfrac{a^6 y_1 - x_1^6 b}{a^4 x_1^4 (a^2 - x_1^2)} - \dfrac{1}{2\rho_0}\,\dfrac{a^2 + x_1^2}{a^2 x_1^2}$
C	$\dfrac{\frac{b}{a^4}\left(x_2^2 - x_1^2\right) + \frac{y_1}{x_1^4}\left(a^2 - x_2^2\right) + \frac{y_2}{x_2^4}\left(x_1^2 - a^2\right)}{(a^2 - x_1^2)(x_1^2 - x_2^2)(x_2^2 - a^2)}$	$\dfrac{b x_1^4 - y_1 a^4}{a^4 x_1^4 (a^2 - x_1^2)} + \dfrac{1}{2\rho_0 a^2 x_1^2}$

Si on ne prend que deux termes, on trouve :

Conditions	2 points $(a\,b,\ x_1 y_1)$	1 point $(a\,b)$, et ρ_0
A	$\dfrac{a^2 \frac{y_1}{x_1^2} - x_1^2 \frac{b}{a^2}}{a^2 - x_1^2}$	$\dfrac{\frac{b}{a^2} - \frac{y_1}{x_1^2}}{a^2 - x_1^2}$
B	$\dfrac{1}{2\rho_0}$	$\dfrac{1}{a^2}\left(\dfrac{b}{a^2} - \dfrac{1}{2\rho_0}\right)$

Art. 6. — Courbe pour remplacer pratiquement une projection de chaînette, $y = \frac{b(n^2 - a^2)}{a^2} \cdot \frac{x^2}{n^2 - x^2}$.

— Les intrados des ponts Boucicaut[39], d'Orléans[40], d'Avignon[41], sont en projection de chaînette, d'équation assez peu maniable : celle-ci, beaucoup plus simple, en est fort rapprochée[42].

38. — Au pont de Luxembourg, on a écarté l'ellipse $y = 34{,}907\left[1 - \sqrt{1 - 0{,}00055\,x^2}\right]$ et adopté : $y = 141{,}2981\left[1 - \sqrt[4]{1 - 0{,}0004\,x^4}\right]$ (Tome II, p. 68).
Les rayons de courbure sont :
à la clef $\rho_0 = 53^m08$; aux retombées $\rho_1 = 42^m19$ (Tome II, p. 60).
La courbe enveloppe un arc de cercle de 48^m10 de rayon.

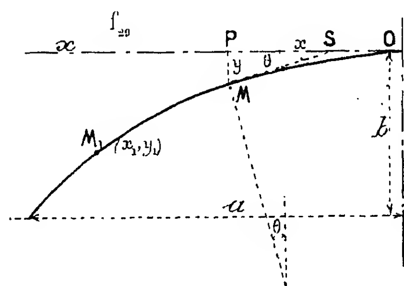
39. — Tome III, p. 243. 40. — Id., p. 255. 41. — Id., p. 270.

42.

	a	b	n^2	$m = \frac{b(n^2 - a^2)}{a^2}$	Écart maximum en 0^m001 par rapport à la courbe adoptée.
Pont Boucicault (Tome III, p. 243)	20^m	5^m	1661,09	15,77161	11^{mm}
Pont d'Orléans (id., p. 255)	21^m925	5^m79	2018,998	29,440556	31^{mm}

On trouve (f_{29}) :

$$\text{Tang } \theta = \frac{2\,n^2\,b\,(n^2-a^2)}{a^2} \cdot \frac{x}{(n^2-x^2)^2} \qquad \text{Sous tang PS} = \frac{y}{\text{tang }\theta} = \frac{x\,(n^2-x^2)}{2\,n^2}$$



$$\rho \left(\begin{matrix}\text{rayon de courbure}\\ \text{en M}\end{matrix}\right) = \frac{\left[(n^2-x^2)^4 + \dfrac{4\,n^4\,b^2\,(n^2-a^2)^2}{a^4}\,x^2\right]^{\frac{3}{2}}}{\dfrac{2\,n^2\,b\,(n^2-a^2)}{a^2}\,(n^2+3\,x^2)\,(n^2-x^2)^3}$$

Pour $x = 0$ $\quad \rho_0 \left(\begin{matrix}\text{rayon}\\ \text{de courbure}\\ \text{au sommet O}\end{matrix}\right) = \dfrac{n^2\,a^2}{2\,b\,(n^2-a^2)}$

Pour $x = a$ $\quad \rho_1 \left(\begin{matrix}\text{rayon}\\ \text{de courbure}\\ \text{à la naissance A}\end{matrix}\right) = \dfrac{\left[(n^2-a^2)^2\,a^2 + 4\,n^4\,b^2\right]^{\frac{3}{2}}}{2\,n^2\,a\,b\,(n^2-a^2)\,(n^2+3\,a^2)}$

Pour définir n^2, on peut se donner :

soit ρ_0 ; alors :

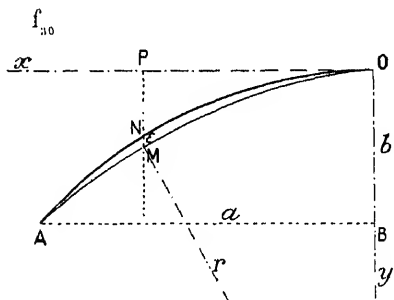
$$n^2 = \frac{2\,\rho_0\,b\,a^2}{2\,\rho_0\,b - a^2} \qquad\qquad y = \frac{b\,x^2}{2\,\rho_0\,b\left(1-\dfrac{x^2}{a^2}\right) + x^2}$$

soit un point $M_1\,(x_1,\,y_1)$; alors :

$$n^2 = \frac{a^2\,x_1^2\,(b-y_1)}{b\,x_1^2 - a^2\,y_1}$$

y, tang θ, ρ sont ∞ pour $x = n$. On s'assurera qu'entre O et A, il n'y a pas de faux sommet.

Art. 7. — Arc de cercle cambré en retranchant quelque chose de chaque ordonnée. — Soit (f_{30}) un arc :



$$y = \text{MP} = r\left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{r^2}}\right)$$

Retranchons la quantité :

$$\text{MN} = \varepsilon = k\,x^m\,(a-x)^n \quad [43,\,44].$$

Pour $x = \dfrac{m\,a}{m+n}$, $\quad\varepsilon$ a son maximum, qui est :

$$\text{Max } \varepsilon = k\,\frac{m^m\,n^n\,a^{m+n}}{(m+n)^{m+n}}.$$

43. — On a fait ainsi au pont de Saint-Loup sur l'Allier (Ligne de la Ferté-Hauterive à Gannat) (7 arcs de 33m à 1/7,5), $\varepsilon = k\,x^4\,(a-x)^2$.

Pour l'intrados, $k = \dfrac{330}{10^9}$; ε atteint 0m15 aux 2/3 de la 1/2 portée à partir de la clef.

Pour l'extrados, $k = \dfrac{247}{10^9}$.

44. — L'équation de la courbe cambrée est :

$$Y = r\left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{r^2}}\right) - k\,x^m\,(a-x)^n.$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x}{\sqrt{r^2-x^2}} - k\,x^{m-1}\,(a-x)^{n-1}\,(m+n)\left[\frac{m\,a}{m+n} - x\right].$$

On vérifie que :

la courbe déformée et l'arc de cercle ont même tangente et même rayon de courbure pour : $x = 0$ si $m \geqslant 2$, $x = a$ si $n \geqslant 2$;

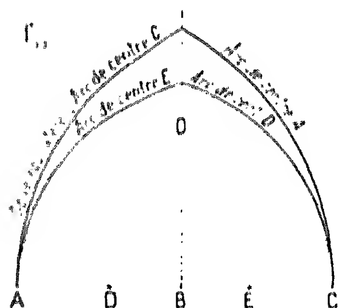
des tangentes parallèles au point où l'écart est maximum, c'est-à-dire pour $x = \dfrac{ma}{m+n}$

A partir de la clef, le rayon de courbure diminue, puis augmente jusqu'à r, aux naissances.

Il y a un faux sommet, mais très peu apparent.

§ 5. — *OGIVES* [45] O

Art. 1. — Ogive surhaussée. — C'est l'ogive des cathédrales [46].



Sur la ligne des naissances A C (f_{33}), prenons, à égale distance du milieu B, deux points D, E, comme centres des arcs de rayon D C, E A. Plus D et E seront loin de B, plus l'ogive sera haute et pointue. S'ils se confondent avec les naissances A et C, l'ogive est équilatère [47, 48].

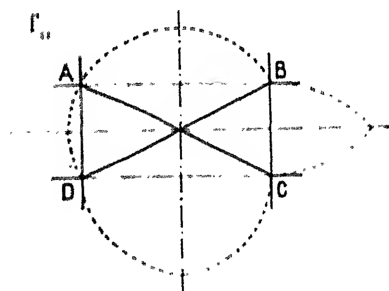
Art. 2. — Ogive surbaissée. — J'ai cité

(Tome III, p. 313) le pont de Martorell sur le Llobregat :

$$2\,a = 37^{m}30\,; \qquad b = 15^{m}30\,; \qquad \sigma = 0{,}56$$

45. — Sont déjà en ogive, par assises horizontales empilées en surplomb : le Dôme d'Abydos (Égypte) (Choisy : *Histoire de l'Architecture*, Tome I, p. 19, 20) ; le « Trésor d'Atrée », à Mycènes (Id., p. 231 ; — Raynaud : « *Art de bâtir* », p. 356, Pl. 44).

L'ogive remonte, en Syrie, à l'antiquité romaine (Choisy, Tome II, p. 20). Elle paraît avoir été importée de Syrie vers la fin du XIe siècle par les pèlerins et les Croisés (Id., p. 512).



46. — Soit A B C D (f_{34}) le plan d'une voûte d'arête. Les arcs diagonaux A C, B D étaient presque toujours en plein cintre, les arcs « formerets » A D, B C, les arcs « doubleaux » A B, C D, en courbe brisée.

Or, c'étaient les arcs diagonaux en plein cintre A C, B D, et non les arcs pointus des têtes, qu'au moyen-âge on appelait « augives » (Choisy, II, p. 271).

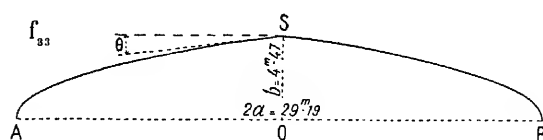
47. — En pratique, on divise A B, B C (f_{33}) en n parties égales : les centres sont les premiers points de division.

On a pris, en Syrie, $n = 8$ (Choisy, II, p. 115) ; en Occident au XIIe siècle, $n = 5$; au commencement du XIIIe, $n = 3$ (ogive tiers-point) ; puis $n = 1$ (ogive équilatère) (Choisy, II, p. 342).

48. — M. Dieulafoy a relevé un grand nombre de ponts persans et indiqué le tracé d'une ogive assez compliquée, presque inscriptible dans une demi-circonférence. (Annales des Ponts et Chaussées, Juillet 1883 : Notice sur la construction des ponts en Perse, p. 23).

On n'en voit guère l'application à nos intrados : autant adopter le plein cintre, qui a un peu plus de débouché et qui, lui, n'a pas besoin d'être chargé à la clef.

On a profilé en ogive persane les becs des ponts de Charrey, d'Orléans (Tome III, p. 257).

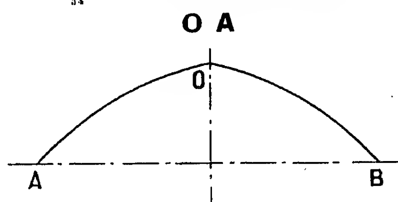


L'intrados du pont de la Trinité à Florence (milieu du XVIe siècle) est fait de deux courbes elliptiques qui se coupent [49, 50] (f_{33}).

Art. 3. — Arcs brisés. — Pour soutenir un poids isolé en O, on brise l'intrados (f_{34}, f_{35}).

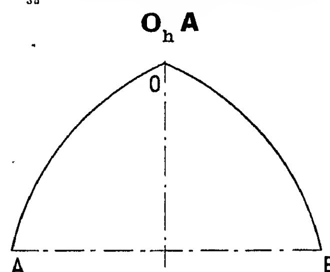
f_{34} — Arc brisé surbaissé

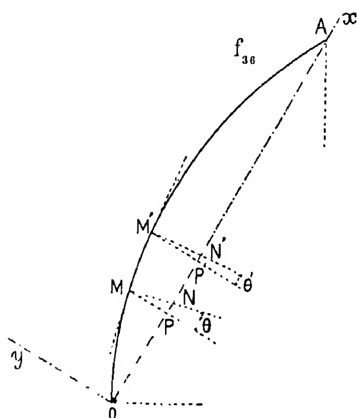
O A



f_{35} — Arc brisé surhaussé

O_h A





Aux arcs de cercle, on peut substituer une autre courbe, pour mieux encadrer les courbes de pression.

Si l'intrados doit passer par deux points M, M', (f_{36}) on peut adopter la forme :

$$y = \alpha\, x\,(1 + \beta\, x + \gamma\, x^2)$$

On a fait ainsi à Fontpédrouse (Voir Tome V) [51].

49. — Ferroni, loc. cit. *renvoi* 21.

50. — Soit proposé de construire une ellipse ayant un sommet en A (f_{33}), son grand axe sur A O, et tangente à une droite d'inclinaison θ au sommet S (a, b).

On trouve pour les 1/2 axes inconnus a' et b' :

$$a' = a\,\frac{b - a \text{ Tang } \theta}{b - 2\,a \text{ Tang } \theta} \qquad b'^2 = b\,\frac{(b - a \text{ Tang } \theta)^2}{b - 2\,a \text{ Tang } \theta}$$

$$\rho_1 \text{ (en A)} = \frac{b'^2}{a'} = \frac{b\,(b - a \text{ Tang } \theta)}{a}$$

51. — On trouve :

$$\beta = \frac{x_1\, y_2\, (c^2 - x_1^2) - x_2\, y_1\, (c^2 - x_2^2)}{c\,[x_2^2\, y_1\, (c - x_2) - x_1^2\, y_2\, (c - x_1)]}$$

$$\gamma = \frac{x_2\, y_1\, (c - x_2) - x_1\, y_2\, (c - x_1)}{c\,[x_2^2\, y_1\, (c - x_2) - x_1^2\, y_2\, (c - x_1)]}$$

$$\alpha = \frac{y_1}{x_1\,[1 + \beta\, x_1 + \gamma\, x_1^2]}$$

En un point M :

$$\text{Tang } \theta = \alpha\,(1 + 2\,\beta\, x + 3\,\gamma\, x^2) \qquad \rho_0 = \frac{[1 + \alpha^2\,(1 + 2\,\beta\, x + 3\,\gamma\, x^2)^2]^{\frac{3}{2}}}{2\,\alpha\,(\beta + 3\,\gamma\, x)}$$

à l'origine :

$$\text{Tang } \theta_0 = \alpha \qquad \rho_0 = \frac{(1 + \alpha^2)^{\frac{3}{2}}}{2\,\alpha\,\beta}$$

CHAPITRE III

ÉPAISSEUR D'UNE VOÛTE

§ 1. — *ÉPAISSEUR A LA CLEF* e_0

Art. 1. — Graphiques de e_0 en fonction de la portée $2a$ et du surbaissement $\sigma = \frac{b}{2a}$.

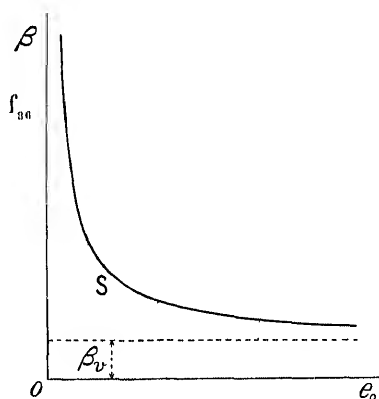
J'ai représenté graphiquement les épaisseurs e_0, avec les portées en abscisses, pour un grand nombre de voûtes, par intrados (pleins cintres, ellipses, arcs de divers surbaissements), en distinguant les ponts sous route des ponts sous rails.

Les graphiques montrent que les constructeurs ont choisi e_0, souvent suivant les matériaux et les hommes dont ils disposaient, d'après leur hardiesse, d'après l'aspect de l'ouvrage, souvent aussi par sentiment.

Art. 2. — Pour une voûte donnée, il y a une valeur de e_0 qu'on n'a pas intérêt à dépasser.

On pourrait croire que, pour une voûte d'ouverture, de montée, de surcharges données, la pression par centimètre carré diminue indéfiniment quand on augmente indéfiniment l'épaisseur ; il n'en est rien.

C'est qu'en effet, la pression moyenne à la clef β est la somme de deux pressions : β_p dûe à la charge sur la voûte (tympans, remplissage, couronnement, surcharge) ; β_v dûe à la voûte seule, qui compte dans la charge totale toujours pour plus de 40 %, et jusqu'à 80 % dans les ponts-route très surbaissés.



β_v ne dépend pas de l'épaisseur à la clef[46].

β_p diminue quand e_0 augmente; admettons qu'elle est de la forme $\frac{k}{e_0}$

La pression moyenne totale est :

$$\beta = \beta_v \left(\begin{matrix}\text{indépendant} \\ \text{de } e_0\end{matrix}\right) + \frac{k}{e_0}$$

Il ne faut pas trop s'écarter du sommet S de cette hyperbole : à gauche, on augmente démesurément la pression ; à droite, on augmente l'épaisseur, sans réduire beaucoup la pression [47, 48].

46. — De même que, dans une colonne cylindrique non chargée, la pression par unité à la base est indépendante du diamètre.

47. — M. Tourtay, qui a fait cette remarque, donne cet exemple appliqué au pont Boucicaut (Tome III, p. 243) : $\beta = 10^k + \frac{10,85}{e_0}$

Epaisseur à la clef e_0	0m20	0m30	0m40	0m50	0m80	1m00	1m50	2m00	2m50	3m00
Pression moyenne β (Kg/cm²)	64k2	46k2	37k1	31k7	23k6	20k8	17k2	15k4	14k3	13k3

En portant l'épaisseur de 1m à 1m50, on n'abaisse la pression moyenne que de 20k8 à 17k2, et on élève la poussée sur la culée (anneau de 1m de largeur) de 208T à 258T.

On a, très sagement, adopté 1m05.

Nouvelles Annales de la Construction, septembre, octobre et novembre 1902. — « *Méthode de calcul rapide des voûtes et de leurs culées* », par C. Tourtay, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

48. — Au pont d'Orléans (Tome III, p. 255), on a adopté e_0 = 1m25.

« ...*Il n'y avait pas lieu de l'augmenter en vue de réduire la pression..., le gain... est... insignifiant* « *quand on passe de... 1m25 à... 1m40. Il y aurait eu, au contraire, avantage..., à abaisser l'épaisseur à* « *1m10 ou 1m15...* »

Génie Civil, 29 septembre 1906, p. 340 : « *Nouveau pont en maçonnerie sur la Loire, à Orléans* ».

Dans les petites et moyennes voûtes, le corps est en moellons ordinaires lités. Sur une ligne de chemin de fer, il y en a beaucoup, et on ne peut pas les suivre de près.

C'est dans ces voûtes-là qu'il faut être le moins hardi : un supplément d'épaisseur y coûte peu.

Les très grandes voûtes, elles, sont surveillées avec un soin particulier.

On n'y emploie que des matériaux de choix permettant les fortes pressions : ces matériaux coûtent cher.

Il importe d'y réduire à juste ce qu'il faut l'épaisseur e_0 : on diminue ainsi, non seulement le cube de la voûte, mais son poids et sa poussée.

Art. 3. — Depuis le milieu du XVIII[e] siècle, on réduit constamment le rapport $\dfrac{e_0 \text{ (Épaisseur à la clef)}}{2\,a \text{ (Portée)}}$

A Lavaur (1771) [49], on avait pris 9 pieds pour 150 pieds, soit $e_0 = 0{,}06\ (2\,a)$.

Au XVIII[e] siècle, on a souvent pris $e_0 = \dfrac{1}{24}\ (2\,a)$ [50] $= \dfrac{4{,}2}{100}\ (2\,a)$

$\dfrac{e_0}{2\,a}$ est descendu à 1/50 aux ponts de Chester [51] et de Luxembourg [52], à 1/60 au pont de Plauen [53].

Art. 4. — Quelques formules empiriques de e_0 (Perronet, Dupuit, Croizette-Desnoyers).

On a attribué à Perronet la formule : $e_0 = 0^m325 + 0{,}035\ (2\,a)$ [54]

Toute formule linéaire donne de trop fortes épaisseurs pour les grandes portées.

Dupuit exprima e_0 en fonction, non plus de $2\,a$, mais de $\sqrt{2\,a}$; il proposa [55] :

pour les pleins cintres et les ellipses : $e_0 = 0{,}20\ \sqrt{2\,a}$

pour les arcs (1/4 en moins !) : $e_0 = 0{,}15\ \sqrt{2\,a}$

Ces formules ne tiennent compte que de la portée, non de la forme de l'intrados, ni des surcharges (route ou chemin de fer), ni du surbaissement.

Pour les très petites portées, e_0 est trop petit : il faut dans les formules un terme constant.

49. — Tome I, p. 97.

50. — C'est ce que Perronet a admis à Neuilly (arche de 120 pieds au 1/4 : $e_0 = \dfrac{120}{24} = 5$ p.).

51. — Tome III, p. 29. 52. — Tome II, p. 67. 53. — Tome III, p. 52.

54. — Il ne l'a pas ainsi énoncée, ni donnée comme de lui ; il a écrit : « *On est dans l'usage de leur* « *donner* (aux voussoirs de clef) *en longueur de coupe, pour les grandes arches qui sont surbaissées du* « *tiers, la vingt-quatrième partie de leur diamètre ;* *... »

* « *Il convient de donner aux voussoirs des clefs des petites arches, un pied de coupe de plus que ce vingt-quatrième, et la* « *diminuer ensuite à raison d'une ligne pour chaque pied d'ouverture des arches,... on peut donner un peu moins de longueur de* « *coupe... lorsque les voûtes sont en plein cintre.* »

« *Mémoire sur la réduction de l'épaisseur des Piles, et sur la courbure qu'il convient de donner aux Voûtes* », lu à l'Académie des Sciences, le 12 novembre 1777.

En anciennes mesures, ces indications seraient ainsi formulées :

Pour les grandes voûtes au 1/3 : $e_0 \text{ (en pieds)} = \dfrac{2\,a}{24}$

Pour les petites : $e_0 \text{ (en pieds)} = 1^p + \dfrac{2\,a}{24} - 1$ ligne par pied de portée $= 1^p + 2\,a \text{ (en pieds)} \left[\dfrac{1}{24} - \dfrac{1}{144}\right]$,

ou $e_0 \text{ (en } m) = 0^m325 + 2\,a \text{ (en } m) \left[\dfrac{1}{24} - \dfrac{1}{144}\right]$ C'est cette formule que donne Sganzin dans son Cours de Construction, comme « *en usage dans les Ponts et Chaussées* », mais sans l'attribuer à Perronet.

Soit $e_0 = 0^m325 + 0{,}034\ (2\,a)$. Léveillé l'écrit : $e_0 = \dfrac{1}{3}\left[1 + \dfrac{2\,a}{10}\right]$ (*Note sur les ponts en maçonnerie*. Le Mans 1855, p. 5).

55. — « *Traité de l'équilibre des voûtes* », J. Dupuit, Paris, Dunod, 1870, p. 185.

Croizette-Desnoyers réalisa un très sensible progrès en exprimant ainsi e_0 :

$$e_0 = \alpha + \beta \sqrt{2\,r}$$ [56] (r rayon de l'arc de mêmes portée et montée)

Il distingua entre les ponts-route et les ponts de chemin de fer, mais non entre un arc et une ellipse de même surbaissement.

Art. 5. — Formule empirique proposée $e_0 = \alpha\left(1 + \sqrt{2\,a}\right)\mu$.

α est un coefficient numérique dont voici les valeurs :

Valeurs de α	Ponts sous			Valeurs de α
	route	chemin de fer à : voie normale	chemin de fer à : voie étroite	
0,12	Limite inférieure			0,12
0,13				0,13
0,14			Limite inférieure	0,14
0,15	Bonne moyenne	Limite inférieure		0,15
0,16				0,16
0,17			Bonne moyenne	0,17
0,18	Limite supérieure	Bonnes moyennes (0,18 et 0,19)		0,18
0,19				0,19
0,20			Limite supérieure	0,20
0,21		Limite supérieure		0,21

Si les matériaux sont excellents, on se tiendra au-dessous des « bonnes moyennes » ; si médiocres, au-dessus.

On est déjà timide aux limites supérieures, bientôt poltron au-delà.

On est déjà hardi aux limites inférieures, bientôt téméraire en-deçà.

Il est quelquefois permis d'être hardi, même très hardi : mais il faut savoir qu'on l'est.

Ces valeurs de α sont justifiées dans l'annexe à la fin de ce Tome.

μ, fonction du surbaissement σ, est :

pour les pleins cintres : $\mu = 1$

pour les ellipses surbaissées : $\mu = \dfrac{4}{3 + 2\,\sigma}$

pour les arcs [57] $\mu = \dfrac{4}{3}\left(1 - \sigma + \sigma^2\right)$.

56. —

	Ponts - route	Ponts de chemin de fer
α	0,15	0,20
Pour σ = 1/2 à 1/4, β =	0,15	0,17
1/6	0,14	0,16
1/8	0,13	0,15
1/10	0,12	0,14
1/12	0,11	0,13

Croizette-Desnoyers : « *Cours de Construction des Ponts* », Tome II, p. 10 et 21, Paris, Dunod, 1885.

57. — Aux arcs peu surbaissés, c'est-à-dire de surbaissement $\sigma \geqslant \dfrac{1}{2\sqrt{3}}$, soit φ (1/2 angle au centre) $\geqslant 60°$, il est d'usage de donner la même épaisseur à la clef qu'au plein cintre de même rayon r, c'est-à-dire $\alpha\left(1 + \sqrt{2\,r}\right)$.

Or, pour $\sigma \geqslant \dfrac{1}{2\sqrt{3}}$, les épaisseurs données par les deux formules :

$$e_0 = \alpha\left(1 + \sqrt{2\,r}\right) \qquad e_0 = \alpha\left(1 + \sqrt{2\,a}\right)\mu$$

ne diffèrent que de quelques millimètres.

Il est plus simple d'appliquer la même, quel que soit le surbaissement.

Si la voûte est en rouleaux superposés de briques, e_0 sera un multiple de la hauteur des briques.[58]

On trouvera, au Tome V, Appendice, des tables de :

$e_0 = \alpha\left(1 + \sqrt{2a}\right)$, pour $2a$ variant de 0m60 à 100m, et α de 0,10 à 0,25.

$\mu' = \dfrac{4}{3 + 2\sigma}$, pour σ variant de $\dfrac{1}{2}$ à $\dfrac{1}{6}$.

$\mu'' = \dfrac{4}{3}(1 - \sigma + \sigma^2)$, pour σ variant de $\dfrac{1}{2}$ à $\dfrac{1}{10}$.

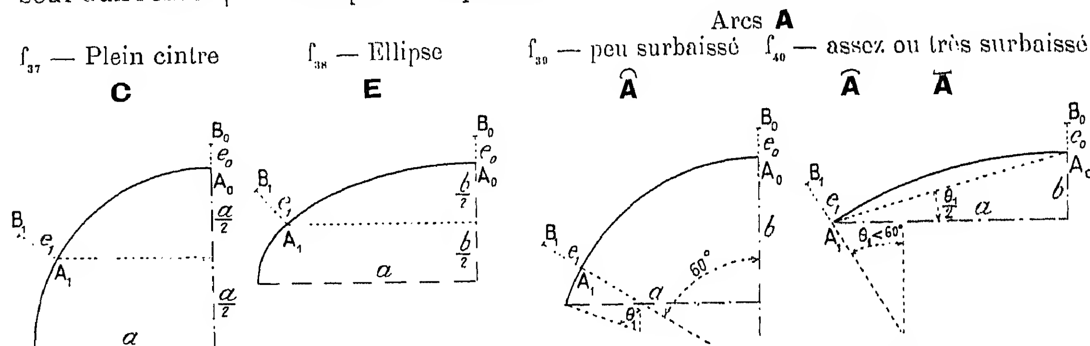
§ 2. — *ÉPAISSEUR AUX REINS* e_1

EXTRADOS CACHÉ PAR DES TYMPANS PLEINS

$$e_1 = \lambda e_0$$

Art. 1. — Formules empiriques proposées pour λ.

— On a l'épaisseur aux reins e_1 en multipliant l'épaisseur à la clef e_0 par un coefficient λ.



On peut sans risques admettre :

	Joint AB, sur lequel on prend l'épaisseur e_1	$\lambda = \dfrac{e_1}{e_0}$ [59]
Pleins cintres **C** (f_{37})	Milieu de la montée.	2 [59 bis]
Ellipses **E** (f_{38})	id.	$1 + 2\sigma$
Arcs **A** — peu surbaissés **A** $\theta_1 \geqslant 60°$ $\sigma \geqslant \dfrac{1}{2\sqrt{3}}$ (f_{39})	A 60° de la clef.	2
Arcs **A** — assez ou très surbaissés **A**, **A** $\theta_1 < 60°$ $\sigma < \dfrac{1}{2\sqrt{3}}$ (f_{40})	Naissances	$1 + 12\sigma^2$

On trouvera au Tome V, Appendice, des tables de λ.

Art. 2. — Épaisseur e_1 définie par la condition que sa projection verticale soit e_0.

— La pression moyenne β_m sur un joint MM' (f_{41}) est :

$$\beta_m = \frac{H\left(\substack{\text{poussée}\\ \text{horizontale}}\right)}{e \cos\theta}.$$

58. — Pont sur la Gimone (Ligne de Toulouse à Auch, 1875-76), anse de panier de 33m au 1/3, 3 rouleaux de briques de 0m42.

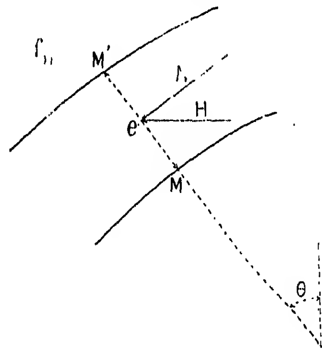
Pont de Saint-Waast (Ligne de Montauban à Castres, 1882-1884) pleins cintres de 20m ; 3 rouleaux de briques de 0m29.

59. — λ résulte moins nettement des voûtes faites que α dans la formule de e_0.

59 bis. — Toutefois, pour les tout petits pleins cintres ($2a < 8^m$), la formule $e_1 = 2e_0$ donnerait des épaisseurs aux reins supérieures à celles des culées aux naissances.

J'indiquerai pour eux la règle à suivre, Tome V, Appendice.

ρ_m sera constante dans toute la voûte si $e \cos\theta$, projection verticale de e, l'est aussi[60].



$$e = \frac{e_0 \text{ (épaiss}^r \text{ à la clef)}}{\cos\theta} = e_0 \sqrt{1 + \operatorname{tang}^2\theta} \quad {}^{61}$$

Avec cette règle, on trouve, pour le joint $A_1 B_1$ défini à l'art. 1 :

Pleins cintres et arcs peu surbaissés : $e_1 = 2\, e_0$

C'est l'épaisseur usuelle.

Ellipses : $e_1 = e_0 \sqrt{1 + 12\,\sigma^2}$

Arcs assez ou très-surbaissés : $e_1 = e_0 \dfrac{1 + 4\,\sigma^2}{1 - 4\,\sigma^2}$

C'est au-dessous des épaisseurs usuelles.

§ 3. — *CE QUE VALENT LES FORMULES EMPIRIQUES PROPOSÉES POUR* e_0, e_1

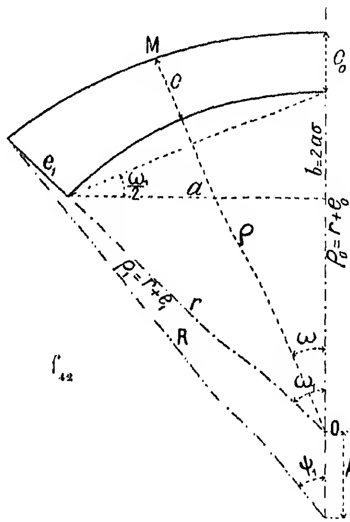
Avec ces formules, on reste dans les moyennes éprouvées : si on s'en écarte, on est prévenu.

Elles suffisent pour une voûte courante, pour le premier essai d'une voûte exceptionnelle,

§ 4. — *EXTRADOS DU CORPS DES VOÛTES*

Art. 1. — Règle. — On cherchera un extrados qui, avec l'intrados, encadre au mieux les courbes de pression : on le trouvera parmi les courbes d'intrados précédemment décrites[62].

On se borne le plus souvent à réunir par un arc de cercle les 2 points $B_0 B^1$ que définissent les épaisseurs e_0, e_1[63] (f_{37} à f_{40}, — p. 344).



f_{42}

60. — Cette remarque a été faite par Déjardin : « *Routine de l'Établissement des voûtes* », Paris, 1845, p. 36.

61. — Ceci est développé plus loin : Titre III, Chap. III.

62. — Tome III, p. 324 à 340.

63. — Supposons l'intrados en arc de cercle de rayon r. Soient (f_{42}) :

$$\rho_0 = r + e_0 \qquad \rho_1 = r + e_1$$

On trouve :

$$R \begin{pmatrix}\text{Rayon} \\ \text{de} \\ \text{l'extrados}\end{pmatrix} = \frac{\rho^2_0 + \rho^2_1 - 2\,\rho_0\,\rho_1 \cos\omega_1}{2\,(\rho_0 - \rho_1 \cos\omega_1)}$$

$$k = R - \rho_0 = \frac{\rho^2_1 - \rho^2_0}{2\,(\rho_0 - \rho_1 \cos\omega_1)} \qquad \sin\psi_1 = \frac{\rho_1}{R} \sin\omega_1$$

Équation de l'extrados en coordonnées polaires avec O comme pôle :

$$\rho = -k\cos\omega + \sqrt{R^2 - k^2 \sin^2\omega}$$

Épaisseur e de la voûte en M : $e = \rho - r$

Équation de la ligne des milieux :

$$\rho_m = r + \frac{e}{2} = \frac{1}{2}\left[r - k\cos\omega + \sqrt{R^2 - k^2\sin^2\omega}\right]$$

Elle est très voisine du cercle passant par les milieux de la clef et des retombées.

Si l'intrados est en plein cintre ou en arc peu surbaissé, $\omega_1 = 60°$, $\cos\omega_1 = \dfrac{1}{2}$

$$R = \frac{(\rho_1 - \rho_0)^2 + \rho_0\,\rho_1}{2\,\rho_0 - \rho_1} \qquad k = \frac{(\rho_1 - \rho_0)\;(\rho_1 + \rho_0)}{2\,\rho_0 - \rho_1}$$

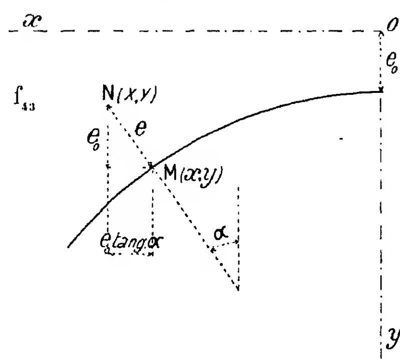
Si, de plus, $e_1 = 2\, e_0$:

$$\rho_1 = r + 2\,e_0 \qquad \rho_0 = r + e_0 \qquad \rho_1 - \rho_0 = e_0$$

$$R = r + \frac{3\,e_0}{r}\left(r + e_0\right) \qquad k = \frac{e_0}{r}\left[2\,r + 3\,e_0\right].$$

Art. 2. — Extrados d'une voûte dont l'épaisseur e en un point quelconque M a une projection verticale constante : $e = \dfrac{e_0}{\cos\alpha}$

1° Ellipse.



On a (f_{43}) :

$$\begin{cases} X = x + e_0 \operatorname{tang}\alpha = x + e_0 \dfrac{dy}{dx} \\ Y = y - e_0 \end{cases}$$

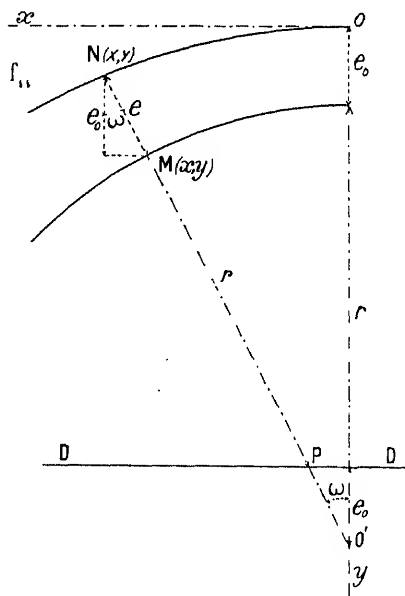
Avec :

$$y = e_0 + b\left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}\right)$$

on trouve :

$$X = \frac{a^2(b - Y) + b^2 e_0}{ab(b - Y)} \sqrt{Y(2b - Y)} \qquad 64$$

Cet extrados est horizontal à la clef. Il a quelque part un point d'inflexion : on s'assurera qu'il est au-dessous des naissances.



2° Arc de cercle. — Faisons, dans cette équation, $a = b = r$.

On trouve :

$$X = \frac{r - Y + e_0}{r - Y} \sqrt{Y(2r - Y)}$$

En coordonnées polaires, on a de suite :

$$\rho = r + e = r + \frac{e_0}{\cos\omega} \qquad 65$$

64. — Pour le milieu de la montée :

$$y = e_0 + \frac{b}{2} \quad x = \frac{a\sqrt{3}}{2} \quad \operatorname{tang}\alpha = \frac{b}{a}\sqrt{3} \qquad X = \sqrt{3}\left[\frac{a}{2} + e_0 \frac{b}{a}\right] \qquad Y = \frac{}{2}$$

65. — Traçons une droite DD, à e_0 de O' (f_{44}).

$$O'P = \frac{e_0}{\cos\omega} \qquad PN = r$$

L'extrados est une conchoïde de Nicomède.

CHAPITRE IV

BANDEAUX

§ 1. — *SOUS TYMPANS PLEINS*

Art. 1. — Réduction des épaisseurs par rapport au corps de la voûte. — On réduit l'épaisseur du bandeau : par économie, parce que le bandeau est en matériaux chers ; pour l'aspect, l'œil n'admet pas aux reins les épaisseurs usuelles des voûtes.

On cherchera une courbe qui s'ajuste bien à l'intrados parmi celles décrites plus haut [66].

Art. 2. — Pleins cintres. — Dans les viaducs [67], le bandeau est, presque toujours, extradossé parallèlement.

Dans de grands pleins cintres, on lui a conservé l'épaisseur du corps [68] : l'effet n'est pas heureux : il y a trop de différence entre la clef et les reins.

Art. 3. — Ellipses. — ***A. - L'intrados est, aux naissances, tangent à deux piles, ou à deux culées, ou à une pile et une culée.***

On a souvent défini l'extrados par un arc de cercle unique B_0 B_1 (f_{43}).



Mais, à partir de la clef, le bandeau semble d'abord extradossé parallèlement, et même, bien que les joints aillent un peu en croissant, paraît, quelquefois, démaigri vers 20 à 30 % du développement à partir de la clef [69].

Aux reins, l'épaisseur croît démesurément, et exagère la hauteur des becs.

On cherchera une courbe qui fasse bon effet.

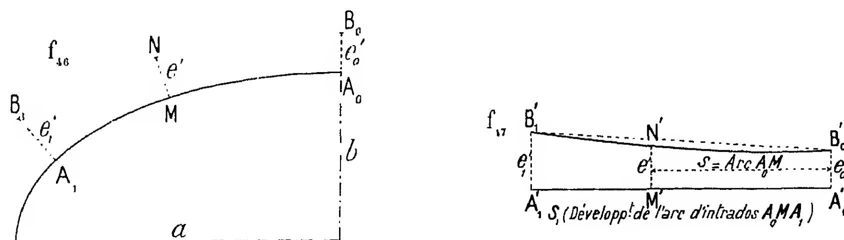
On peut, par exemple, faire croître l'épaisseur e' en fonction de la longueur de l'intrados à partir de la clef, depuis e'_0 épaisseur à la clef jusqu'à l'épaisseur e'_1 adoptée aux reins.

66. — Tome III, p. 324 à 340.

67. Tome V, Appendice, Viaducs.

68. Ponts de Collonges (Tome I, p. 31), d'Oloron (id., p. 45).

69. Ponts de Bercy à Paris, de Port-Sainte-Marie sur la Garonne, (ligne de Condom à Port-Sainte-Marie).



Au pont de Marmande (f_{46}, f_{47}) [70], nous avons adopté :

$$e' = e'_0 + (e'_1 - e'_0)\frac{s^2}{S_1^2}$$

Ce sont les ordonnées de la parabole B'$_0$ B'$_1$ (f_{47}) : l'effet est bon.

Au pont de Valence [71] on a pris :

$$e'^2 = e'^2_0 + (e'^2_1 - e'^2_0)\frac{s^2}{S_1^2}$$

B'$_0$ B'$_1$ est un arc d'hyperbole [72].

Il faut être bien sûr que la courbe adoptée a une tangente horizontale à la clef [73].

B. - L'extrados est une demi-courbe complète [74]. — Quand, au lieu de s'arrêter à une pile ou à une culée, l'extrados est une demi-courbe complète, on l'étudiera de même en vue du meilleur effet.

Pour l'aspect, on fera croître l'épaisseur à partir de la clef.

Sí, par économie, on doit accepter une épaisseur constante k, on extradossera, non suivant une ellipse $a + k$, $b + k$ [75], mais suivant une courbe parallèle à l'ellipse d'intrados [76].

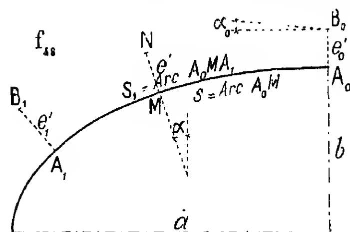
70. — $a = 18^m$; $b = 10^m$; $e'_0 = 1^m35$; $e'_1 = 2^m10$.

71. — Tome I, p. 173.

72. — Supposons e' calculée par cette formule (s compté sur la fibre moyenne), et la fibre moyenne en arc de cycloïde.

On peut alors calculer assez simplement, par la méthode de M. Résal, les éléments de la courbe de pression.

(Note présentée à l'Académie des Sciences par M. Auric, Ingénieur des Ponts et Chaussées. Annales des Ponts et Chaussées, 4e trimestre 1905, p. 282).



73. — Par exemple, on n'acceptera pas la droite B'$_0$ B'$_1$ (f_{47}).

$$e' = e'_0 + (e'_1 - e'_0)\frac{s}{S_1}$$

Elle donne à la clef un angle rentrant (f_{47}, f_{48}).

On trouve, en effet :

$$\text{tang}\ \alpha_0 = \frac{(e'_1 - e'_0)\ a^2}{(a^2 + b\,e'_0)\ S_1}$$

74. — à tangentes verticales aux naissances. (Préliminaires, Tome III, p. 3).

75. — Les têtes des souterrains à une voie en anse de panier surhaussée, extradossées parallèlement, semblent maigres au tiers supérieur de la montée.

76. — Tome III, p. 329.

Art. 4. — Arcs. — On a souvent extradossé les bandeaux parallèlement, c'est-à-dire avec une épaisseur uniforme [77].

L'œil veut un peu d'accroissement, mais pas trop.

Au pont des Invalides (arcs de 31m66 au 1/10,2 et de 31m19 au 1/7,6), on a conservé pour le bandeau les épaisseurs du corps : 1m20 à la clef, 1m70 aux retombées : c'est trop aux reins.

Au pont de Saint-Loup sur l'Allier [78] (arcs de 33m à 1/7,5), nous avons adopté 1m15, 1m30.

Dans les arcs très tendus, on ne gagne pas grand'chose à réduire le bandeau : on lui donne partout les mêmes épaisseurs qu'à la voûte [79].

On s'assurera que la courbe choisie pour l'extrados a une tangente horizontale à la clef [80].

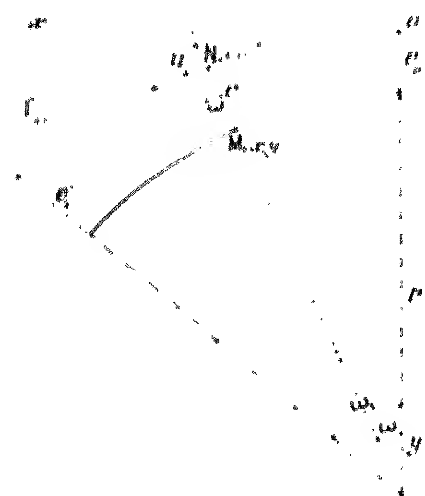
On se gardera, par exemple, au-dessus d'un intrados en arc, de faire varier l'épaisseur proportionnellement à la distance angulaire au sommet [81] : mais on la pourra faire varier comme son carré [82].

§ 2. — *BANDEAUX SOUS TYMPANS TRAVERSÉS PAR DES ÉVIDEMENTS APPARENTS*

Art. 1. — Épaisseur. — Dans les ouvrages à tympans pleins, l'extrados du corps des voûtes est caché ; on y peut, sans dommage pour l'aspect, réduire le bandeau.

Mais, quand les tympans sont évidés par des arches transversales, l'extrados est vu comme l'intrados : le bandeau et le corps de la voûte ont partout la même épaisseur ; on a quelquefois réduit par un chanfrein les bandeaux [83] : mais, de loin, c'est l'extrados de la voûte que l'on voit.

77. Pont National à Paris (Portée : 31m50, montée : 1m50).



78. Ligne de Gannat à La Ferté-Hauterive.

79. — Pont Boucicaut, Tome III, p. 243.

80. Voir ce qui a été dit plus haut pour l'extrados des voûtes en ellipse (renvoi 73).

81. On aurait alors (f. 40) : $e' = e'_0 + (e'_1 - e'_0)\dfrac{\omega}{\omega_1}$

L'extrados est une spirale d'Archimède :

$$\rho = r + e'_0 + (e'_1 - e'_0)\frac{\omega}{\omega_1}$$

Et aussi la ligne des milieux : $\rho = r + \dfrac{e'}{2}$.

$$\text{Tang } u = \omega + \frac{(r + e'_0)\,\omega_1}{e'_1 - e'_0}$$

Pour $\omega = 0$, u n'est pas 90°, la courbe n'est pas horizontale au sommet.

82. On a alors $\rho = r + e'_0 + (e'_1 - e'_0)\dfrac{\omega^2}{\omega^2_1}$ $\quad$ $\text{Tang } u = \dfrac{(r + e'_0)\,\omega^2_1}{2\,\omega\,(e'_1 - e'_0)} + \dfrac{\omega}{2}$

Pour $\omega = 0$ $\quad u = 90°$

83. Ponts sur la Moselle de Schweich, Trittenheim, Tome III, p. 268, p. 276.

Sous tympans évidés, on réduit les épaisseurs adoptées aux reins pour le corps des voûtes sous tympans pleins, pour deux motifs :

parce qu'aux reins la charge est réduite, la courbe de pression moins cambrée, l'effort moindre ;

pour l'aspect, parce que, comme on l'a dit plus haut pour les bandeaux, l'œil n'accepte pas une voûte trop épaisse aux reins [84].

Ainsi nous avons adopté pour λ au pont de Lavaur [85] : 1,70 au lieu de 2 ; au pont de Luxembourg [86] : 1,50 au lieu de 1,70.

On pourra, comme première approximation, prendre pour les pleins cintres et les arcs, 0,85 λ (λ des formules pour tympans pleins données plus haut, p. 344).

Les voûtes en ellipse ont une grande épaisseur aux reins [87] et doivent être fort réduites. Au pont des Amidonniers [88], aux retombées des bandeaux amont du pont amont, une voussure réduit l'épaisseur à 74/100 (voûte de 46^m), 77/100 (voûtes de 42^m), 79/100 (voûtes de 38^{m}50), de celle du corps.

Art. 2. — Courbe d'extrados. — Comme dans le cas des tympans pleins, on cherchera une courbe qui s'ajuste bien à l'intrados, ait une tangente horizontale à la clef, et encadre au mieux les courbes de pression [89, 90].

84. — Reins trop épais aux ponts évidés de Brent, (Tome I, p. 34), de Céret, (Tome II, p. 160).

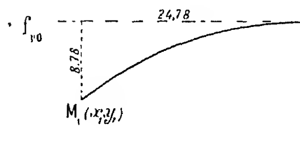
85. — Tome II, p. 135. 86. — Tome II, p. 67. 87. — Verdun-sur-le-Doubs (Tome I, p. 165).

88. — Tome I, p. 193. 89. — Pont de Luxembourg (Tome II, p. 68), $e = e_0 + ky^{0,6}$ *e* croît agréablement et la courbe est horizontale à la clef.

90. — Extrados du pont des Amidonniers, voûte de 46^m (Tome I, p. 195).

On donnait un point des reins de l'extrados :

$$x_1 = 24^m78 \qquad y_1 = 8^m78 \quad (f_{50})$$



On a trouvé :

$$y = 11{,}34728\left(1 - \sqrt[2]{1 - 0{,}001545\;x^2}\right)$$
$$y = 19{,}245\left(1 - \sqrt[3]{1 - 0{,}001366\;x^2}\right)$$
$$y = 27{,}294155\left(1 - \sqrt[4]{1 - 0{,}001283\;x^2}\right)$$
. . . .
$$y = 51{,}7825\left(1 - \sqrt[7]{1 - 0{,}0011849\;x^2}\right) \quad (\text{adopté})$$

L'indice du radical augmentant, les courbes sont de plus en plus au-dessous de l'ellipse.

L'arc de cercle est $y = 39{,}35858\left(1 - \sqrt[2]{1 - 0{,}0006455\;x^2}\right)$.

TITRE II

COMMENT ON CALCULE LES EFFORTS DANS LES GRANDES VOÛTES

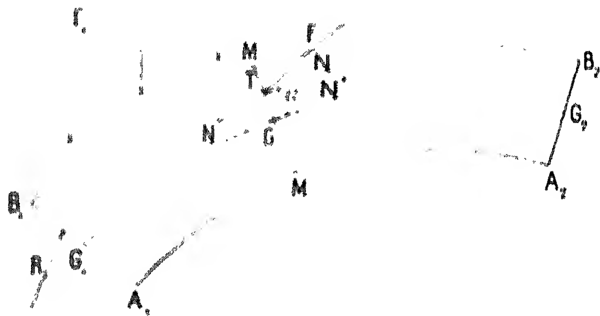
HYPOTHÈSE ÉLASTIQUE

CHAPITRE I

COMMENT ON DETERMINE POUR UNE SECTION QUELCONQUE L'EFFORT NORMAL ET LE COUPLE DE FLEXION

§ 1. *COMPOSANTES DE L'EFFORT TOTAL SUR UNE SECTION COUPLE DE FLEXION*

Art. 1. — Effort normal à la section N. — Effort tranchant T. — Coupe de flexion N u (f₁).



Soient :

$A_1 B_1 A_2 B_2$ un arc ;

$G_1 G_2$ sa fibre moyenne, — lieu des centres de gravité des sections transversales, telles que M G M, faites par des plans également inclinés sur l'intrados et l'extrados ; c'est, en pratique, le lieu des milieux des joints normaux à l'intrados.

On suppose l'arc symétrique par rapport au plan vertical de la fibre moyenne, et toutes les forces extérieures dans ce plan.

La partie d'arc à droite de la section M M exerce sur elle un effort F égal et directement opposé à la résultante des forces extérieures appliquées à gauche de M M.

F peut se décomposer en 2 forces :

N, normale à la section : c'est l'effort « normal »;

T, dans le plan de la section : c'est l'effort « tranchant ».

Dans les voûtes en maçonnerie, F est à peu près normal à la section ; on convient de négliger T.

Je mène par le centre de gravité G deux forces égales à N et de sens contraires N', N''.

Tout se réduit :

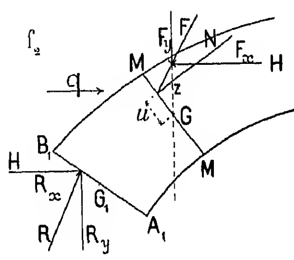
1° à l'effort normal N' = N appliqué en G ;

2° au couple de flexion N u, — égal au moment $\mathfrak{M}$ par rapport à G des forces extérieures à gauche de la section M M.

Art. 2. — Poussée horizontale H. — A la rencontre de F avec la verticale de G, décomposons F en forces verticale F_y et horizontale F_x (f_2).

S'il n'y a que des forces verticales à gauche de M M, F_x est égale à la composante horizontale R_x de la réaction de l'appui.

Elle est constante à toute hauteur : c'est la « poussée horizontale » de la voûte, H.



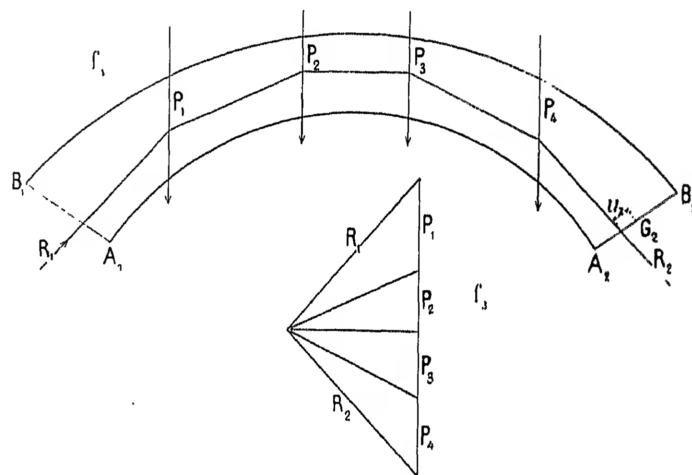
$$\mathfrak{M} = Nu = Hz$$

Si la voûte reçoit d'une voûte transversale d'élégissement une poussée q (f_2),

$$H = q + R_x$$

La poussée horizontale de la retombée est réduite de q.

§ 2. — *SI ON CONNAIT LA RÉACTION D'UN APPUI, ON PEUT, POUR CHAQUE SECTION, CALCULER OU CONSTRUIRE L'EFFORT NORMAL* N *ET SON BRAS DE LEVIER* u.



Supposons connue en grandeur et direction, la réaction de l'appui de droite R_2. Avec le polygone des forces (f_3), on a la réaction de l'autre appui R_1.

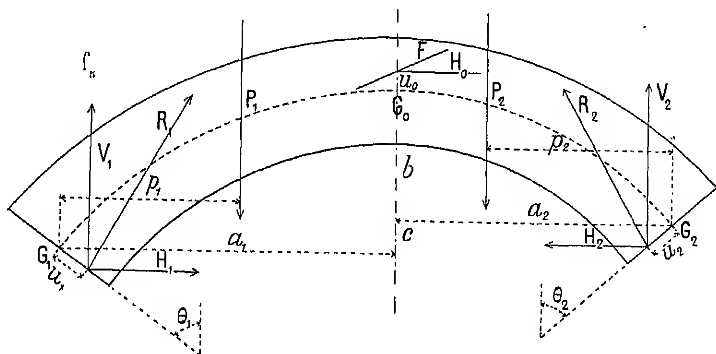
Si on a, de plus, le point d'application de R_2 (à u_2 de G_2), on peut construire le funiculaire (f_1), qui se ferme par R_1 et donne pour chaque section N et u, sur l'appui de gauche R_1 et u_1.

§ 3. — *COMMENT ON DÉTERMINE LA RÉACTION D'UN APPUI*

Art. 1. — La Statique ne donne que 3 équations pour 6 inconnues.

— Soit une voûte de fibre moyenne $G_1\ G_0\ G_2$ (f_5).

Pour simplifier, je la suppose soumise seulement à des forces verticales.



Soient :

R_1, R_2 les réactions de ses appuis, appliquées à u_1, u_2 des milieux $G_1 G_2$, positifs au-dessous de $G_1\ G_2$;

V_1, H_1 ; V_2, H_2 leurs composantes verticales et horizontales ;

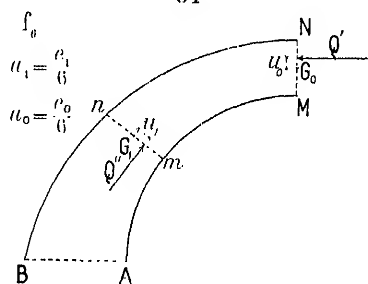
P_1, P_2 la résultante des forces verticales appliquées entre G_1 et G_0, entre G_0 et G_2.

Il y a 6 inconnues : V_1, H_1, u_1 ; V_2, H_2, u_2.

La Statique donne 3 équations d'équilibre [1] : il en manque trois. Si les voussoirs étaient indéformables, il faudrait se les donner arbitrairement [2].

Art. 2. — Hypothèses proposées pour avoir trois autres équations, en supposant les voussoirs indéformables.

A. - Hypothèse de Navier [3]. — « *Nous admettrons* (f_6) :



« *Que les deux voussoirs séparés par le joint* « M N *ne pressent point l'un contre l'autre par* « *l'arête inférieure* M.

« ....

« *Le point d'application de la résultante* Q' « *est aux 2/3 de la hauteur du joint, à compter de* « *l'extrémité inférieure* M......................

« ....

1. — $V_1 + V_2 = P_1 + P_2$ $\qquad H_1 = H_2$

(Moments autour de G_1) $V_1\, u_1 \sin\theta_1 + H_1\, u_1 \cos\theta_1 + V_2\,[a_1 + a_2 - u_2 \sin\theta_2] + H_2\,(c - u_2 \cos\theta_2) = P_1\, p_1 + P_2\,(a_1 + a_2 - p_2)$

2. — Pour une voûte articulée aux reins, en G_1, G_2, on a : $u_1 = 0$ $\qquad u_2 = 0$.
S'il y a une troisième articulation à la clef, on a : $u_0 = 0$.
Tout est défini.

3. — Navier. — *Résumé des leçons données à l'École royale des Ponts et Chaussées sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines.* — Première partie, p. 164 et suivantes, Paris, Firmin-Didot père et fils — MDCCCXXVI.

« *En considérant maintenant le joint de rupture* m n, *on admettra également* « *que la pression est nulle à l'arête supérieure* n, *où le joint tend à s'ouvrir, et* « *qu'elle augmente uniformément depuis cette arête jusqu'en* m, *où cette poussée* « *est à son maximum.* »

C'est supposer que la courbe de pression coupe la clef M N au 1/3 supérieur, le « joint de rupture » *m n* au 1/3 inférieur.

B. - Méthode de Méry[4]. — Au vrai, Méry n'a pas tiré des expériences de Boistard une méthode pratique : il n'a pas fixé de point de la courbe de pression, il a seulement indiqué comment on la construit, si on en connaît deux points.

La méthode connue sous son nom[5] consiste tout simplement à admettre les deux hypothèses enseignées bien avant par Navier, à savoir :

que la courbe de pression passe par M_0 (f_7), tiers supérieur de la clef A_0B_0; M, tiers inférieur d'un joint dit « de rupture », à déterminer aux reins ;

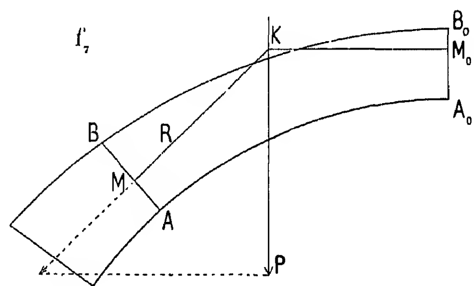
qu'en ces deux points elle est tangente aux bords du noyau central, et normale aux joints A_0B_0, AB (f_7).

Il eût été juste de l'appeler : méthode Navier-Méry.

Les deux hypothèses de Navier fournissent les 3 équations qui manquent ;

$$u_1 = \frac{e_1}{6} \qquad u_2 = \frac{e_2}{6} \qquad u_0 = \frac{e_0}{6}$$

Pour les pleins cintres, les ellipses, les arcs peu surbaissés, on détermine ainsi le « joint de rupture »[6] :



Soient (f_7) : AB un joint quelconque, P la résultante des charges entre AB et la clef.

On mène par le 1/3 supérieur de la clef une horizontale M_0K, par K une perpendiculaire à AB.

Si $MA = \frac{1}{3} AB$, AB est le joint de rupture. On essaye un joint plus haut, si $MA < \frac{AB}{3}$[7], plus bas, si $MA > \frac{AB}{3}$.

4. — Annales des Ponts et Chaussées, 1840, 1er semestre, page 50, « *Sur l'équilibre des voûtes en berceau* », par M. E. Méry.

5. — Elle est exposée par Morandière : « *Traité de la Construction des Ponts et Viaducs* », p. 246. — Paris, Dunod, 1874.

6. — M. Résal : « *Emplacements, — Débouchés, — Fondations, — Ponts en maçonnerie,* » p. 188, Paris, Baudry et Cie, 1896.

7. — Morandière et Croizette-Desnoyers admettent comme angle du joint de rupture avec la verticale :

	Tympans pleins					Plein cintre à tympans élégis
	Plein cintre	Ellipse		Arc		
		au 1/3	au 1/4	au 1/5	à moins de 1/5	
Morandière..........	60°	45°	40°	naissances	naissances	»
Croizette-Desnoyers.	60°	45°	40°	43°		58° à 56°

Morandière : Loc. cit., renvoi 5, p. 208, Paris, Dunod, 1874.
Croizette-Desnoyers : « *Cours de Construction des Ponts* », p 412 et 462, Paris, Dunod, 1885.

Pour les arcs assez et très surbaissés, on admet que le joint des naissances est le joint de rupture, bien que la résultante passant par le 1/3 ne lui soit pas normale.

La méthode, dite de Méry, a été appliquée à un très grand nombre de grandes voûtes qui ont tenu : elle est fort simple, très pratique, très suffisante pour les voûtes courantes[8].

Il est bon de toujours commencer par faire une épure Méry : elle donne fort approximativement la poussée, elle indique si et comment il faut modifier la courbe moyenne.

En Allemagne, on a souvent ainsi opéré :

On étale la surcharge sur toute la voûte ; on trace la courbe Méry, et une autre par les milieux de la clef et des retombées.

Puis on ne surcharge qu'une demi-voûte ; on trace une courbe de pression par le milieu de la clef, par le 1/3 inférieur de la retombée du côté chargé, par le 1/3 supérieur de la retombée du côté non chargé.

Si toutes ces courbes restent dans le noyau central, on suppose la voûte stable.

Art. 3. — Si les voussoirs sont élastiques (élastiques comme l'entend la Résistance des Matériaux), on leur peut appliquer les 3 équations « de déformation ».

A. – *La pierre est beaucoup plus déformable que l'acier.* — Soient :

E, le coefficient d'élasticité d'un « matériau »,

$$E\ (\text{en } {}^{\text{kg}}/_{1^{\text{m}2}}) = \varepsilon \times \overline{10}^{9} \qquad \text{ou} \qquad E\ (\text{en } {}^{\text{kg}}/_{\overline{0^{\text{m}}01}^{2}}) = \varepsilon \times \overline{10}^{5}$$

ΔL, le raccourcissement évalué en microns (μ) d'un prisme de 1^{m} de long, sous une pression β (${}^{\text{kg}}/_{\overline{0^{\text{m}}01}^{2}}$)

On a : $$\Delta L\ ({}^{\text{en }\mu}/_{\text{sur }1^{\text{m}}}) = \frac{10\,\beta\ ({}^{\text{kg}}/_{\overline{0^{\text{m}}01}^{2}})}{\varepsilon}$$

ε est, pour l'acier, 22 à 25 ; pour la maçonnerie de voûte, 0,3 à 3.[9]

A pression égale par $\overline{0^{\text{m}}01}^{2}$, les raccourcissements sont de 7 à 83 fois plus grands dans la maçonnerie que dans l'acier[10].

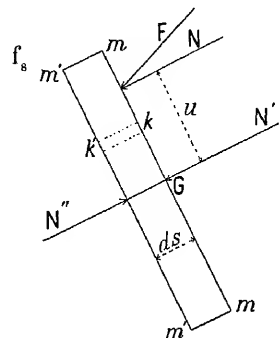
Il était donc fort naturel de calculer les grandes voûtes comme des arcs élastiques homogènes, c'est-à-dire avec les deux hypothèses que traduisent les formules dites de déformation de la Résistance des Matériaux : je suis, pour être clair, forcé de les rappeler.

B. — *Hypothèses de la Résistance des Matériaux.*

B_1 – Hypothèse de Hooke[11]. — *Tant que l'effort par unité reste au-dessous*

8. — Pour les petites voûtes, on adopte, sans épure, des épaisseurs justifiées par une longue pratique.
9. — Voir plus loin, Titre III, chap. IV, § 1 et 2.
10. — L'acier travaillant à 1.000k, une pierre de $\varepsilon = 1$ travaillant à 40k, ont la même déformation.
11. — « *ut tensio sic vis* ». — Robert Hooke (1635-1703) : « *De Potentiā restitutivā* », — Londres, 1678.

d'une limite, dite d'élasticité, l'allongement ou le raccourcissement est proportionnel à l'effort, c'est-à-dire que, pour un même corps, le rapport de l'effort à la déformation, dit « coefficient d'élasticité », est constant [12].



B_2 - Hypothèse de Navier. — Une section transversale reste plane après flexion.

Soit (f_8) une tranche d'épaisseur ds, symétrique par rapport au plan vertical contenant les forces extérieures, pressée par une force normale N, à u de son centre de gravité G.

Soient :

Ω la surface de la section $m\,m$;

I son moment d'inertie par rapport à un axe perpendiculaire au plan de la figure en G ;

E le « coefficient d'élasticité » dans le sens de la fibre moyenne.

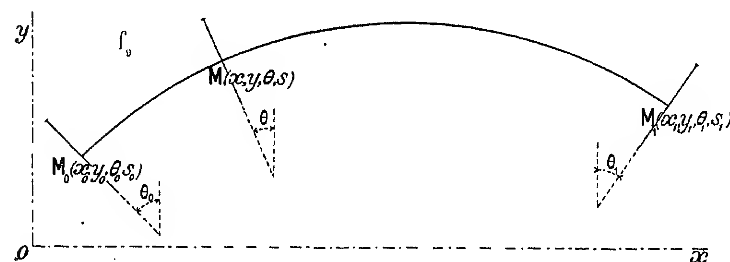
Je mène par G deux forces parallèles N', N'', égales à N et de sens contraires.

N' comprime uniformément la tranche de $\frac{N\,ds}{E\,\Omega}$ (Hooke).

Le couple N u fait tourner la face $m\,m$ par rapport à $m'm'$ d'un angle $d\,\theta$.

En supposant que chaque fibre, telle que $k\,k'$ « *se comporte comme une tige isolée et qu'elle n'est pas influencée par les fibres voisines,* » [13] que, par conséquent, on peut lui appliquer l'hypothèse de Hooke, — que toute la section reste plane après flexion (Navier), qu'ainsi, non seulement la partie comprimée et la partie tendue sont chacune restées planes après déformation, mais aussi la section entière, c'est-à-dire que les coefficients d'élasticité à la tension et à la compression sont égaux, on trouve : $d\,\theta = \frac{N\,u\,ds}{E\,I}$.

C. - Équations de déformation. — Soient (f_9) :



M_0 (x_0, y_0, θ_0), M_1 (x_1, y_1, θ_1), un arc de la fibre moyenne avant déformation ;

M (x, y, θ), un point de l'arc ;

α, le coefficient de dilatation linéaire.

12. — $E = \frac{\beta\ (\text{kg}/_{1^{mq}})}{\frac{dL}{L}\left(\text{en mêmes unités}\right)} = \frac{\text{effort par unité de surface}}{\text{allongement par unité de longueur}}$.

13. — Bresse, « *Résistance des Matériaux* ». p. 33, Paris, 1866.

Supposons appliqués :
1° au G de chaque section transversale, un effort normal N ;
2° autour de G de chaque section, un couple $\mathfrak{M} = N u$.
(N et u variables d'une section à l'autre).
Supposons enfin que la température de l'air change de $t°$.

Les déplacements de M_0 (Δx_0, Δy_0, $\Delta \theta_0$) étant supposés connus, ceux de M_1 (Δx_1, Δy_1, $\Delta \theta_1$) sont donnés par ces trois formules dites de déformation [14] :

$$\Delta \theta_1 = \Delta \theta_0 + \int_{s_0}^{s_1} \frac{\mathfrak{M}\, ds}{E I}$$

$$\Delta x_1 = \Delta x_0 - \Delta \theta_0 (y_1 - y_0) - \int_{s_0}^{s_1} \frac{\mathfrak{M}\, (y_1 - y)\, ds}{E I} + \int_{x_0}^{x_1} \frac{N\, dx}{E\, \Omega} + \alpha\, t\, (x_1 - x_0)$$

$$\Delta y_1 = \Delta y_0 + \Delta \theta_0 (x_1 - x_0) + \int_{s_0}^{s_1} \frac{\mathfrak{M}\, (x_1 - x)\, ds}{E I} + \int_{y_0}^{y_1} \frac{N\, dy}{E\, \Omega} + \alpha\, t\, (y_1 - y_0)$$

Si l'arc est inarticulé, ou, — comme on le dit souvent, — « encastré » aux naissances, les points M_0, M_1, les sections M_0, M_1 sont immobiles :
Δx_0, Δy_0, $\Delta \theta_0$ Δx_1, Δy_1, $\Delta \theta_1$ sont nuls.

La première équation se réduit à :

$$\int_{s_0}^{s_1} \frac{\mathfrak{M}\, ds}{E I} = 0$$

Elle exprime que la somme des rotations de chaque section par rapport à la précédente est nulle entre les retombées.

Les deux autres deviennent :

$$\int_{s_0}^{s_1} \frac{\mathfrak{M}\, y\, ds}{E I} + \int_{x_0}^{x_1} \frac{N\, dx}{E\, \Omega} + \alpha\, t\, (x_1 - x_0) = 0$$

$$- \int_{s_0}^{s_1} \frac{\mathfrak{M}\, x\, ds}{E I} + \int_{y_0}^{y_1} \frac{N\, dy}{E\, \Omega} + \alpha\, t\, (y_1 - y_0) = 0$$

$\mathfrak{M}$, N, s'expriment en fonction des forces extérieures autres que la réaction de l'appui M_0, lesquelles sont connues, et en fonction de cette réaction inconnue.

14. — Bresse. — « *Cours de Mécanique appliquée* », 2e édition, 1re Partie, Paris, Gauthier-Villars, 1866, p. 90 et suivantes.

M. Résal. — *Résistance des Matériaux*. — Paris, Baudry, 1898, p. 247 et suivantes.

M. Résal a, le premier en France, enseigné à calculer des voûtes par les formules de déformation [15, 16].

D. - Les équations de déformation ne tiennent pas compte de la rigidité des tympans. — Elles supposent que l'arc se déforme librement, que les charges lui sont transmises comme par des tiges verticales isolées.

Il n'en est point ainsi : les tympans, les plinthes sont rigides et soulagent l'arc [17].

On l'a observé aux viaducs de la ligne d'Issy à Viroflay [18], aux ponts de Lavaur [19] et Antoinette [20].

Art. 4. — En pratique, graphiquer au lieu de calculer.

Le calcul est laborieux, rebutant : on y peut, sans s'en apercevoir de quelque temps, commettre de grosses erreurs.

Le graphique fatigue moins ; il se prête mieux à toutes les combinaisons de surcharges ; avec lui, on voit.

Tous deux viennent d'hypothèses inexactes : la précision du calcul y est fort inutile ; celle du graphique suffit ; il n'y a vraiment pas à s'inquiéter des décimales quand les entiers sont suspects.

A l'APPENDICE, Tome V, je donnerai tout ce qu'il faut pour faire une épure de voûte, et ce qui résulte d'un grand nombre d'épures.

15. — MM. Degrand et Résal : « *Ponts en maçonnerie* », Tome premier : « *Stabilité des voûtes* », p. 103 et suivantes, — Paris, Baudry et Cie, 1887.

M. Résal : « *Emplacements, débouchés. Fondations des Ponts en maçonnerie* », p. 191 et suivantes, — Paris, Baudry, 1896.

M. Résal : « *Stabilité des Constructions* », p. 367 et suivantes, — 564 et suivantes, — Paris, Béranger, 1901.

Voir aussi :

M. Pigeaud : Annales des Ponts et Chaussées, 1905, 2e trimestre, p. 202 : « *Calcul des arcs encastrés* ».

M. Auric : « *Ponts en maçonnerie : Calcul et Construction* », p. 250 et suivantes, — Paris, Octave Doin et fils, 1911.

16. — Je me permets de rappeler ici une indication donnée en 1886 :

« *Avec des modules de résistance moindres et un coefficient d'élasticité bien plus voisin de celui de* « *rupture, une voûte à ciment se comporte comme un arc en fonte encastré aux naissances ; on lui doit* « *donc appliquer, non plus les hypothèses surannées basées sur les expériences de Boistard, mais les* « *formules de la Résistance des Matériaux, contrôlées par la mesure directe, faite avec des instruments* « *assez précis, des mouvements au décintrement, sous l'action des charges et de la température, du* « *coefficient d'élasticité...* »

Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1886, p. 427 : « *Construction des Ponts du Castelet, de Lavaur et Antoinette* ».

Ce contrôle des formules de déformation, on l'attend encore.

17. — C'est ainsi que les longerons et le tablier d'un ouvrage en métal, en béton armé, solidarisent ses pièces de pont, reportent sur ses voisines une partie de ce qui en charge une. Génie Civil, 24 août 1912 : « ***Etude sur la solidarité des pièces de pont*** », M. Lossier.

18. — Revue Générale des Chemins de fer, juillet 1902, p. 9 : « *Notes sur les travaux de la ligne d'Issy à Viroflay* », M. Rabut.

19. — Tome II. p. 143   20. — Tome II, p. 149.

CHAPITRE II

ON CONNAIT L'EFFORT TOTAL *N* SUR UNE SECTION, SA DISTANCE *u* AU CENTRE DE GRAVITÉ. COMMENT *N* SE DISTRIBUE-T-IL SUR LA SECTION ? EFFORTS PAR UNITÉ EN CHAQUE POINT

§ 1. — *FORMULES*

Menons par le centre de gravité G, deux forces N', N" égales à N et de sens contraires (f_{10}).

L'effort normal N' produit une pression uniforme $\frac{N}{\Omega}$.

Le couple de flexion Nu produit en un point K à z de G un effort : $\frac{N u z}{I}$.

L'effort total par unité à z de G est donc :

$$\beta_z = \frac{N}{\Omega} + \frac{N u z}{I} = \frac{N}{\Omega}\left[1 + \frac{u z \Omega}{I}\right] \quad [21]$$

Soit, pour une section rectangulaire de hauteur e et de 1^m de largeur [22] :

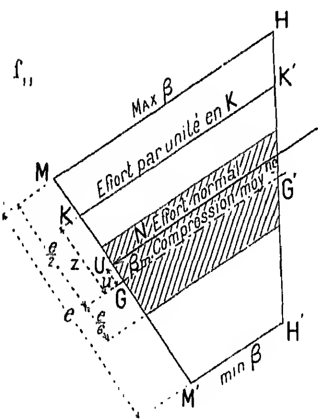
$$\beta = \frac{N}{e}\left[1 + \frac{12\, u z}{e^2}\right].$$

L'effort par unité est maximum à l'extrémité M du même côté que N par rapport à G $\left(z = \frac{e}{2}\right)$, minimum à l'autre $\left(z = -\frac{e}{2}\right)$

$$\begin{cases} \text{Max}\ \beta\ (\text{en M}) = \frac{N}{e}\left[1 + \frac{6u}{e}\right] \\ \text{Min}\ \beta\ (\text{en M'}) = \frac{N}{e}\left[1 - \frac{6u}{e}\right] \end{cases}$$

§ 2. — *REPRÉSENTATION GRAPHIQUE*

Art. 1. — Le centre de pression U est dans le noyau central : $u < \frac{e}{6}$. — (*Règle du trapèze*).



Soient (f_{11}) : M H = Max β; M' H' = min β.

Considérons le trapèze M H M' H'.

K K'est l'effort par unité en K, à z de G.

L'effort par unité en G, G G' est la pression moyenne : $\beta_m = \frac{N}{e} = \frac{\text{Max}\,\beta + \min\beta}{2}$.

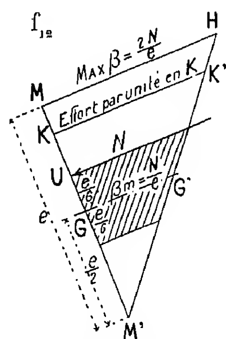
L'effort normal N fait équilibre à toutes les forces élémentaires développées sur M M' : il passe donc par le centre de gravité du trapèze et est égal à sa surface.

Si N passe par G, $u = 0$: le trapèze devient un rectangle de surface N ; sur M M', la pression est partout $\frac{N}{e}$.

21. — N en kilogs, les longueurs en m. — Alors β en $^{kg}/_{1^{m2}}$. 22. — $\Omega = e \quad I = \frac{1}{12}e^3$ (e en m).

Art. 2. — Le centre de pression U est à la limite du noyau central : $u = \frac{e}{6}$ (f_{12}).

$$M\,H = \text{Max}\,\beta = \frac{2\,N}{e} = 2\,\beta_m \qquad \text{Min}\,\beta = 0.$$



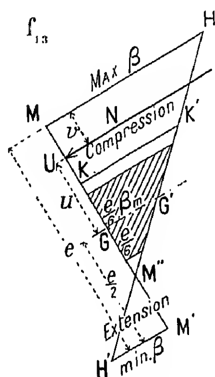
Le trapèze M H M' H' de f_{11} est devenu le triangle M H M' de f_{12}.

K K' est l'effort par unité en K.

L'effort normal N passe par le centre de gravité du triangle et est égal à sa surface.

Art. 3. — Le centre de pression U est hors du noyau central $u > \frac{e}{6}$.

A. - Si la maçonnerie pouvait travailler à la tension.



Soient (f_{13}) :

$$M\,H = \text{Max}\,\beta \qquad M'\,H' = \min\,\beta \quad \text{(ici négatif)}$$

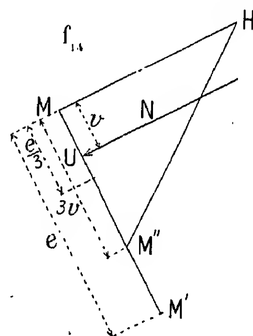
$$M\,M'' = M\,M' \frac{M\,H}{M\,H + M'\,H'} = \frac{1}{2}\left[e + 6\,u\right]$$

$$\text{Soit } v = \frac{e}{2} - u, \qquad MM'' = 2\,e - 3\,v.$$

K K' est l'effort par unité en K. C'est une compression du même côté que N par rapport à M'', — une tension du côté opposé.

N est la différence des surfaces M H M'', M'' H' M'.

B. - Si la maçonnerie ne peut pas travailler à la tension (Règle du triangle). — En pratique, on convient de ne pas tenir compte de la partie tendue, mais seulement de la partie comprimée, limitée à 3 v (f_{14}).



Alors, M H (comme dans le 2e cas) $= \frac{2\,N}{3\,v}$ (2 fois l'effort sur 3 fois la bande comprimée).

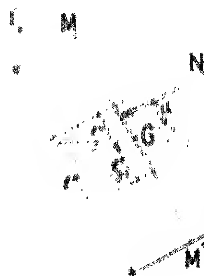
TITRE III

RELATION ENTRE LES CHARGES ET LA FORME DE LA VOÛTE

CHAPITRE I

ON DOIT TRACER LA FIBRE MOYENNE DE FAÇON QUE LES COURBES DE PRESSION S'EN ÉCARTENT LE MOINS POSSIBLE

En tous les points d'un ouvrage, la maçonnerie devrait travailler à son effort maximum.



On vient de rappeler que, quand une section M M' (f_1) est soumise à un effort normal N, la pression maxima par unité β s'exerce en M, et est, pour $u \leq \frac{e}{6}$:

$$\text{Max } \beta = \beta_m \Big\} = \underset{\text{moyenne}}{\text{pression}} \frac{N}{e} \Big\{ \left(1 + \frac{6u}{e}\right)$$

Pour rapprocher Max β de β_m, il faut diminuer u, c'est-à-dire adopter une fibre moyenne telle que la courbe de pression la plus éloignée s'en écarte peu.

On s'est souvent borné à vérifier que les funiculaires des charges coupant la clef et les retombées en des points convenus, milieu ou tiers, ne sortaient pas du noyau central.

Mieux : on a tracé par les milieux de la clef et des retombées le funiculaire des poids morts, soit seuls, — soit en y ajoutant ou la moitié de la surcharge ou toute, — et pris ce funiculaire comme nouvelle fibre moyenne.

Pour les très grandes voûtes, les très surbaissées, on doit construire toutes les courbes de pression, puis modifier le tracé de la voûte, pour les rapprocher de la fibre moyenne.

CHAPITRE II

CAS D'UNE VOÛTE INFINIMENT MINCE

RELATION ENTRE :

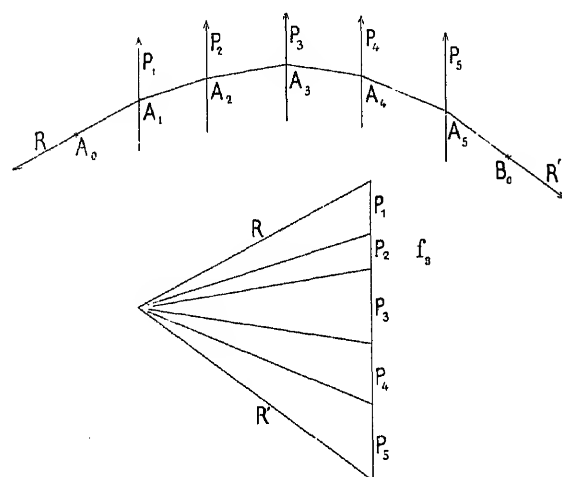
D'UNE PART, LA FORME D'UNE VOÛTE INFINIMENT MINCE, INCOMPRESSIBLE, DONT CHAQUE ÉLÉMENT S'ORIENTE SUIVANT LA RÉSULTANTE DES FORCES QUI LUI SONT APPLIQUÉES [1], C'EST-A-DIRE UNE COURBE FUNICULAIRE DES CHARGES ;

D'AUTRE PART, UNE LIGNE LIMITANT LES CHARGES VERTICALES COMPTÉES A PARTIR DE LA VOÛTE, DITE LIGNE DE CHARGE.

§ 1. — *PRÉLIMINAIRES*

Art. 1. — Rappel de la notion des courbes funiculaires. —

Considérons (f_3) un fil, sans poids, flexible, inextensible, attaché en deux points A_0 et B_0, soumis à des forces verticales, mais agissant de bas en haut, P_1, P_2,... Il prendra la forme d'un polygone dont chaque côté s'oriente suivant la résultante des actions d'un même côté, forces P_1, P_2,... et réaction de l'attache ; c'est le polygone funiculaire des forces P_1, P_2,...



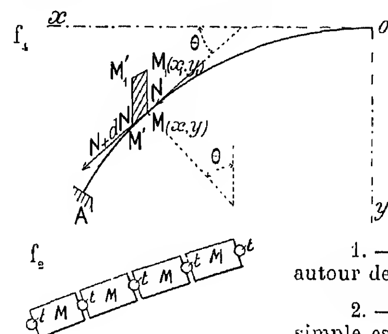
Si les forces se rapprochent, ses côtés diminuent, chacun d'eux demeurant orienté suivant la résultante des forces qui agissent sur lui, laquelle est ici une tension : les tensions des attaches sont égales et opposées à l'effort des côtés extrêmes.

Supposons maintenant que les forces verticales soient des poids, agissant de haut en bas ; que le fil soit incompressible au lieu d'être inextensible.

On aura le même polygone des forces, le même funiculaire ; chaque élément restera orienté suivant la résultante des forces situées d'un même côté ; mais cette résultante, les réactions des appuis, sont alors des compressions [2].

Art. 2. — Définition de la ligne de charge. —

Soit O le sommet d'une voûte AO infiniment mince (f_4).



En un point quelconque M (x, y), élevons une verticale sur laquelle M M_1 représentera, en hauteur de maçonnerie de même densité γ que celle de la voûte, la charge en M.

Le lieu de M_1 (x_1, y_1) est la *ligne de charge*.

1. — Par exemple une chaîne d'acier faite de maillons pleins M, mobiles autour de tourillons t (f_2).

2. — Pour se représenter de suite la forme de la fibre moyenne, le plus simple est de continuer à supposer le fil flexible et les forces de bas en haut.

Art. 3. — Relation entre la fibre moyenne *(courbe funiculaire)* et la ligne de charge. — M M' (f_4) est en équilibre sous l'action de : N à droite de $M M_1$, $N + dN$ à gauche de $M' M'_1$, $\gamma (y - y_1) dx$, poids de la tranche de maçonnerie $M M_1 M'_1 M'$.

Écrivons que :

la variation de la projection horizontale est nulle :

$d (N \cos \theta) = 0$ ou $N \cos \theta =$ Constante $= H$ (poussée horizontale) ;

la variation de la projection verticale est $\gamma (y - y_1) dx$:

$$d (N \sin \theta) = d \left[\frac{H}{\cos \theta} \sin \theta \right] = d (H \operatorname{Tang} \theta) = H d \left(\frac{dy}{dx} \right) = \gamma (y - y_1) dx$$

$$H \frac{d^2 y}{dx^2} = \gamma (y - y_1)$$

Si on se donne la fibre moyenne y, la ligne de charge est :

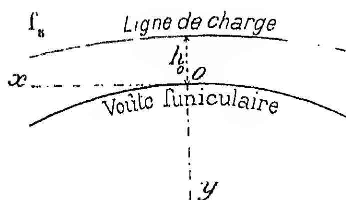
$$y_1 = y - \frac{H}{\gamma} \frac{d^2 y}{dx^2}$$

On l'a par une simple dérivation.

Si on se donne la ligne de charge y_1, il faut, pour avoir la fibre moyenne y, intégrer une équation différentielle, ce qui n'est pas souvent possible.

Art. 4. — Poussée horizontale H dans une voûte funiculaire infiniment mince :

$$H \text{ (en kg.)} = \gamma \begin{pmatrix} \text{poids du m. c.} \\ \text{de maçonnerie,} \\ \text{en kg.} \end{pmatrix} \times h_0 \begin{pmatrix} \text{charge à la clef} \\ \text{en hauteur de ma-} \\ \text{çonnerie, en } m. \end{pmatrix} \times \rho_0 \begin{pmatrix} \text{rayon de courbure} \\ \text{de la voûte} \\ \text{à la clef, en } m. \end{pmatrix}$$



Pour la clef (f_5) :

$$y = 0 \qquad \frac{dy}{dx} = 0 \qquad \rho_0 = \frac{1}{\left(\frac{d^2 y}{dx^2}\right)_0} \qquad y_1 = - h_0$$

$$H = \gamma \, h_0 \, \rho_0$$

Il est le produit du poids sur la clef γh_0 par le rayon de courbure à la clef [3].

3. — On a proposé des formules empiriques de e_0 en fonction de ρ_0.

Celle-ci : $e_0 = \frac{1}{3} (1 + 0,2 \rho_0)$ est attribuée à Saint-Guilhem par Déjardin *(Routine de l'établissement des voûtes)*.

Dans la monographie du pont sur la Big-Muddy River (Tome I, p. 225, renvoi 2), j'ai cité celles de M. J. M. Rankine :

$e_0 = 0,227 \sqrt{\rho_0}$ (ponts à plusieurs arches) $\qquad e_0 = 0,191 \sqrt{\rho_0}$ (ponts à une arche)

§ 2. — *DE LA FIBRE MOYENNE, DÉDUIRE LA LIGNE DE CHARGE,*
C'EST-A-DIRE :
COMMENT FAUT-IL CHARGER UNE VOÛTE POUR QU'ELLE SOIT UNE COURBE FUNICULAIRE DES CHARGES ?

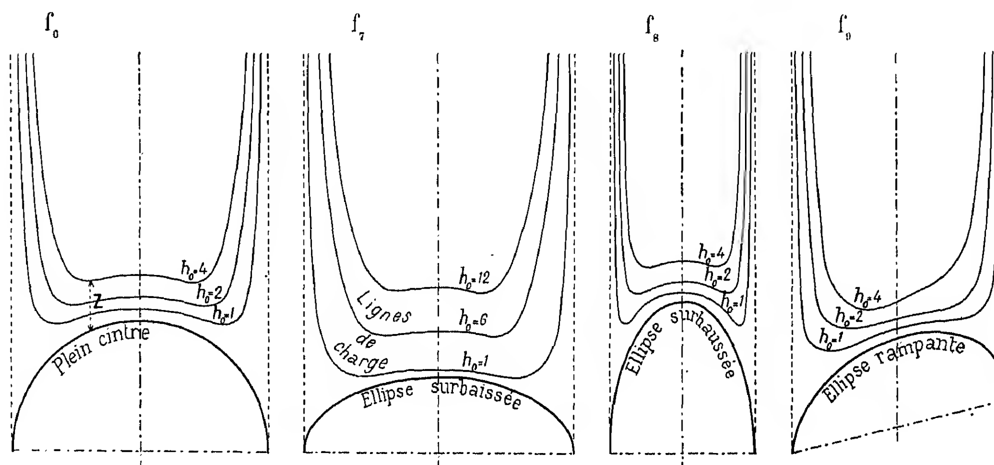
Art. 1. — Plein cintre. Ellipse.

	Plein cintre (r)	Ellipse (a, b)
Fibre moyenne $y =$	$r\left(1-\sqrt{1-\frac{x^2}{r^2}}\right)$	$b\left(1-\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}\right)$
Poussée horizontale $\mathrm{H} = \gamma h_0 \rho_0 =$	$\gamma h_0 r$	$\gamma h_0 \frac{a^2}{b}$
Charge comptée à partir de la voûte (distance verticale entre la fibre moyenne y et la ligne de charge y_1): $Z = y - y_1 = \frac{\mathrm{H}}{\gamma}\frac{d^2y}{dx^2} = h_0\rho_0\frac{d^2y}{dx^2} =$	$\dfrac{h_0}{\left(1-\frac{x^2}{r^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$	$\dfrac{h_0}{\left(1-\frac{x^2}{a^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$
Charge sur les naissances	∞	∞

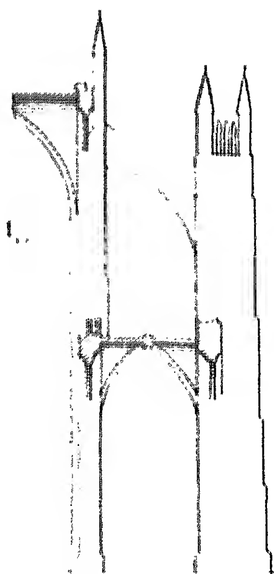
(Les verticales des appuis sont les asymptotes de y_1).

Voici (f_6 à f_9) quelques lignes de charge :

Voûtes infiniment minces et leurs lignes de charge.

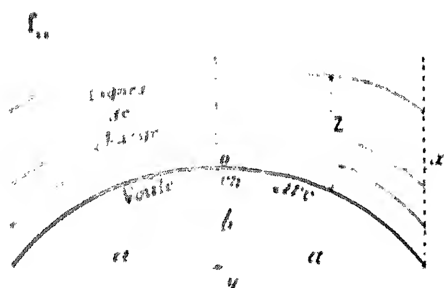


Au lieu du plein cintre entier de f_6, n'en considérons qu'une moitié : la ligne de charge aura toujours une asymptote verticale à la naissance.



Supposons que l'arc soit la fibre moyenne d'un arc boutant poussé par une voûte d'arête (f_{10}). La ligne de charge s'inscrira fort exactement dans l'arc boutant et son contrefort, si utilement lesté d'un pinacle.

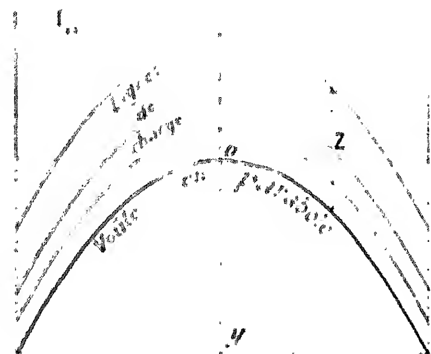
Les Architectes de nos vieilles cathédrales sentaient l'équilibre des voûtes.



Art. 2. — Arc de cercle. Arc d'ellipse (f_{11}).

— Arrêtons aux verticales des retombées ce qu'on vient de trouver pour le plein cintre et l'ellipse.

	Arcs de portée $2a$ de montée b	
	Arc de cercle (rayon r)	Arc d'ellipse ($\frac{1}{2}$ axes : a' b')
Voûte $y =$	$r\left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{r^2}}\right)$	$b'\left(1 - \sqrt{1 - \frac{x^2}{a'^2}}\right)$
Charge sur la voûte : $Z = y - y_1 =$	$\frac{h_0}{\left(1 - \frac{x^2}{r^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$	$\frac{h_0}{\left(1 - \frac{x^2}{a'^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$
Charge aux retombées	$\frac{h_0}{\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$	$\frac{h_0}{\left(1 - \frac{a^2}{a'^2}\right)^{\frac{3}{2}}}$



Art. 3. — Parabole (f_{12}).

— A la funiculaire $y = p\,x^2$, de poussée $H = \gamma\, h_0 \rho_0 = \frac{\gamma\, h_0}{2p}$, correspond la ligne de charge :

$$y_1 = p\,x^2 - \frac{2\,H\,p}{\gamma} = p\,x^2 - h_0\,.$$

C'est la funiculaire déplacée de h_0.

La charge est constante, et partout h_0.

Art. 4. — Projection de chaînette.

$$y = k\left(e^{\frac{x}{k}} + e^{-\frac{x}{k}} - 2\right)$$

Pour une charge h_0 à la clef :

$$H = \gamma\, h_0\, \rho_0 = \gamma\, h_0 \frac{p^2}{2\,k}$$

La ligne de charge est :

$$y_1 = y - \frac{H}{\gamma}\frac{d^2y}{dx^2} = y - \frac{h_0\,p^2}{2\,k}\cdot\frac{k}{p^2}\left[e^{\frac{x}{p}} + e^{-\frac{x}{p}}\right] = \frac{1}{k}\left(k - \frac{h_0}{2}\right)y - h_0$$

Pour $k = +\dfrac{h_0}{2}$, $\qquad y_1 = -\,h_0$.

La ligne de charge est une droite.

Ainsi, la projection de chaînette $y = \dfrac{h_0}{2}\left(e^{\frac{x}{p}} + e^{-\frac{x}{p}} - 2\right)$ a comme ligne de charge la droite $y_1 = -\,h_0$.

La poussée est :

$$H = \gamma\,h_0\,\frac{p^2}{h_0} = \gamma\,p^2.$$

On peut donc écrire l'équation sous cette forme :

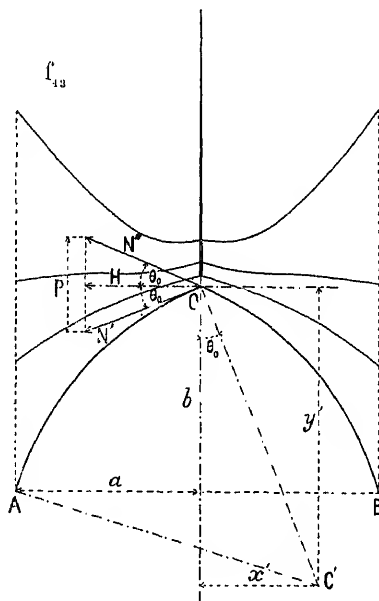
$$y = \frac{h_0}{2}\left[e^{\frac{x}{\sqrt{\frac{H}{\gamma}}}} + e^{-\frac{x}{\sqrt{\frac{H}{\gamma}}}} - 2\right].$$

Nous la retrouverons.

Art. 5. — Courbe pouvant remplacer une projection de chaînette : $y = \dfrac{m\,x^2}{n^2 - x^2}$ [4]. — La charge est :

$$Z = y - y_1 = \frac{H}{\gamma}\,\frac{2\,m\,n^2\,(n^2 + x^2)}{(n^2 - x^2)^3};$$

sur la clef : $h_0 = \dfrac{H}{\gamma}\,\dfrac{2\,m}{n^2}$.



Art. 6. — Ogive (f_{13}).

On a pour l'arc de gauche O A :

$$y = y' - \sqrt{r^2 - (x + x')^2}.$$

La charge est :

$$Z = y - y_1 = \frac{H}{\gamma}\,\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{H}{\gamma}\,\frac{r^2}{\left[r^2 - (x + x')^2\right]^{\frac{3}{2}}};$$

Sur la clef :

$$h_0 = \frac{H}{\gamma}\,\frac{r^2}{y'^3}.$$

A la clef, la compression N' sur l'arc de gauche est inclinée sous l'horizon de :

$$\operatorname{Tang}\theta_0 = \frac{x'}{y'} \qquad\qquad N' = \frac{H}{\cos\theta_0}$$

4. — Voir Tome III, p. 337.

Sur l'arc de droite, la compression N" = N' est inclinée de même sur l'horizon.

Il faut, pour l'équilibre, charger la pointe de l'ogive d'un poids :

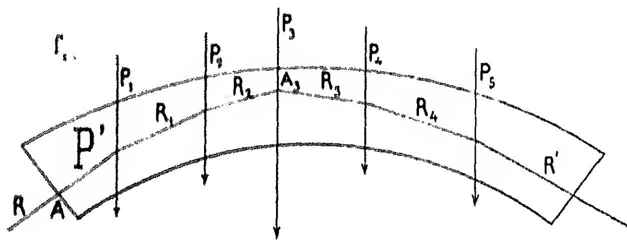
$$P = 2\ N' \sin \theta_0 = 2\ H\ \text{Tang}\ \theta_0 = 2\ \gamma\ h_0 \frac{y'^3}{r^2} \times \frac{x'}{y'} = 2\ \gamma\ h_0 \frac{x'\ y'^2}{r^2}$$

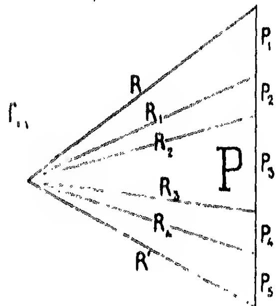
§ 3. — *RELATION ENTRE QUELQUES FORMES DE FUNICULAIRES ET QUELQUES DISPOSITIONS DES CHARGES*

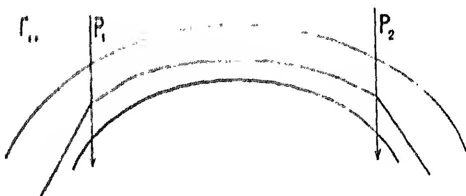
Soient P_1, P_2, P_3, P_4......... les charges (f_{14}).

Supposons que l'on ait déterminé une des réactions R et son point d'application A.

Construisons le polygone des forces P (f_{14}) et le funiculaire P' (f_{15}).







Si un poids lourd P_3 est appliqué en A_3, le funiculaire y a une chute : contre P_3, la voûte fait pointe.

Si c'est au sommet, on brisera la voûte en ogive.

Réciproquement, il faut charger la clef d'une ogive [5].

Si la voûte, peu chargée au cerveau, porte aux reins deux poids isolés P_1, P_2 (f_{16}), le funiculaire, plat au cerveau, aura une chute aux reins.

Réciproquement, pour la stabilité d'une voûte dont ce funiculaire est la fibre moyenne, il faut peu de charge au cerveau, deux poids isolés aux reins.

Si, sur le dos d'une voûte, court un viaduc, le funiculaire est un polygone dont chaque sommet est sous une pile du viaduc.

Les charges et la fibre moyenne sont réciproques.

Si la fibre moyenne a été tracée pour une certaine disposition des charges, il faut, pour la stabilité, lui faire porter ces charges-là.

Par exemple, on ne doit décintrer une voûte en ogive qu'après l'avoir chargée à la clef ; une voûte en arc de cercle cambrée en vue du poids des tympans, qu'après avoir construit les tympans.

Les derniers côtés d'un funiculaire de poids verticaux ne sont jamais verticaux : il y a toujours une poussée horizontale aux retombées.

5. — C'est ainsi qu'on a judicieusement chargé d'une petite chapelle la clef du pont de Martorell (Tome III, p. 313).

On peut l'annuler, soit complètement par une arche voisine de même poussée, soit partiellement par une arche de poussée moindre.

Mais dans une voûte isolée, la fibre moyenne n'est jamais verticale aux naissances : ceci condamne les pieds-droits verticaux et justifie les culées perdues.

On reviendra plus tard avec détails sur tout ceci : c'est assez important pour être dit deux fois.

CHAPITRE III

VOÛTE D'ÉPAISSEUR FINIE

SOUMISE A DES CHARGES OU SURCHARGES CONTINUES

RECHERCHE PAR LE CALCUL DE LA FORME A LUI DONNER
POUR QUE LE TRAVAIL MAXIMUM Y DÉPASSE PEU LE TRAVAIL MOYEN
C'EST-A-DIRE POUR QUE LES COURBES DE PRESSION
S'ÉCARTENT PEU DE LA FIBRE MOYENNE

§ 1. — *HYPOTHÈSES ADMISES*

Je laisse de côté, comme peu ou point appliquées, les méthodes de Carvallo [6], Yvon Villarceau [7], Saint-Guilhem [8], et rappelle seulement les recherches de Denfert-Rochereau [9, 10], de MM. Tourtay, Legay, Tolkmitt. Après Denfert-Rochereau, voici ce qu'ils admettent :

La courbe limitant la charge est une droite horizontale à h_0 au-dessus de la tangente au sommet : la surface de charge est continue, homogène, sans vides, même si les tympans sont évidés.

La voûte n'est soumise qu'à des forces verticales.

On a précédemment établi [11] que, réduite à sa fibre moyenne, courbe funiculaire, cette voûte est la projection de chaînette :

$$y = \frac{h_0}{2}\left[e^{\frac{x}{\sqrt{\frac{H}{\gamma}}}} + e^{-\frac{x}{\sqrt{\frac{H}{\gamma}}}} - 2\right]^{12}$$

h_0 est la charge sur la clef en hauteur de maçonnerie, H la poussée horizontale, γ le poids du m. c. de maçonnerie.

6. — Annales des Ponts et Chaussées, 1853-I.

7. — Revue générale de l'Architecture et des Travaux Publics, 1844, p. 58 « *Equilibre des voûtes en berceau cylindrique* ».

8. — Après Yvon Villarceau, Saint-Guilhem suppose « *que la maçonnerie des reins et la surcharge de* « *la voûte produisent sur l'extrados le même effet qu'un liquide homogène affectant la même forme et* « *ayant la même densité que le massif de la voûte ;...* »

Il a donné des tables permettant de tracer l'intrados et l'extrados, de façon que la courbe de pression coïncide avec la fibre moyenne.

Annales des Ponts et Chaussées, 1859, 1er semestre, p. 83 « *Mémoire sur l'établissement des arches de pont assujetties aux conditions du maximum de stabilité* ».

On a appliqué sa méthode à l'arche de 40m de Signac, 1871-72 (Tome I, p. 131), à la voûte de 33m sur la Gimone (Ligne de Toulouse à Auch), 1875-76...

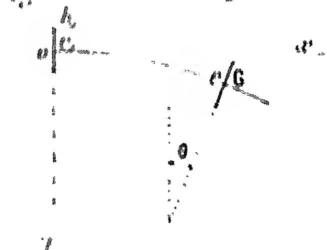
9. — Le défenseur de Belfort, alors Capitaine du Génie, Professeur à l'Ecole d'Application de Metz.

10. — Revue générale de l'Architecture et des Travaux Publics, 1859 « *Mémoire sur les voûtes en berceau portant une surcharge limitée à un plan horizontal* ».

11. — Chap. II, § 2, art. 4.

12. — Dans son Mémoire « sur l'équilibre des voûtes en berceau » (Annales des Ponts et Chaussées, 1840, I, p. 56), Méry avait signalé p. 69 « *l'analogie entre la chaînette et la courbe de pression* ».

La projection verticale $e \cos \theta$ de l'épaisseur e en un point quelconque est constante : c'est l'épaisseur à la clef e_0 (f_{17}).



Dans une section quelconque la pression moyenne est :

$$\frac{N}{e} = \frac{N}{\frac{e_0}{\cos \theta}} = \frac{N \cos \theta}{e_0} = \frac{H \left(\substack{\text{poussée}\\ \text{horizontale}}\right)}{e_0}$$

Elle est constante.

§ 2. *MÉTHODE DE M. TOURTAY* [13]

M. Tourtay s'est proposé de déterminer, non la fibre moyenne, mais l'intrados, puis l'extrados de la voûte.

Il la suppose d'abord réduite à un filet élémentaire, projection de chaînette.

Pour passer à la voûte épaisse, voici son ingénieux raisonnement :

« *Imaginons.... qu'au lieu d'avoir un seul filet supportant la charge totale,* « *.... nous superposions par le sommet un nombre* n *de ces filets, chacun d'eux* « *supportant une fraction* $\frac{1}{n}$ *de la charge, et faisons croître* n *indéfiniment* [14]. »

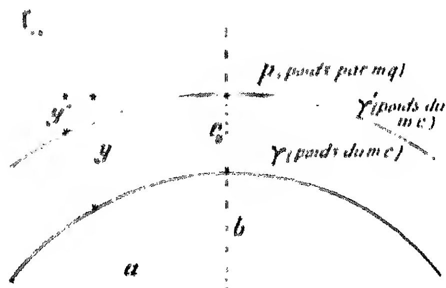
Si on pouvait superposer les filets sans vide, on constituerait une voûte ayant partout la même pression moyenne.

Il reste toujours du vide ; mais on détermine les constantes de manière à le réduire à un minimum négligeable pour les voûtes surbaissées à plus de 1/7.

Dans une voûte ainsi constituée, on peut tracer une courbe de pression passant, à très peu près, au milieu de tous les joints.

Tous les filets, en particulier les courbes d'intrados et d'extrados, la fibre moyenne, toutes les courbes de pression, sont des projections d'une même chaînette.

Soit : $k = \frac{1}{2}\left(\omega + \frac{1}{\omega} - 2\right)$



M. Tourtay établit [15] des formules qui se résument ainsi : (voir f_{18} pour le sens des lettres).

$$\frac{1}{k} = \frac{p + \gamma e_0}{\gamma' b}\left[1 - \frac{e_0 b \left(\frac{\gamma}{\gamma'} - 1\right)}{\frac{\gamma e_0 b}{\gamma'} + a^2 \left(\frac{\omega - 1}{\omega + 1}\right)^2 \frac{1}{(\text{Log. nep. } \omega)^2}}\right]$$

13. « *Étude sur le calcul des arches surbaissées en maçonnerie* », par C. Tourtay, Ingénieur des Ponts et Chaussées.
Revue Générale de l'Architecture et des Travaux Publics, — 43e volume, Paris, André, Daly fils et Cie, 1886, p. 15.

14. ...id..., p. 20.

15. — *loc. cit., renvoi 13*, p. 20, 64 et suivantes.
Dans une note du 11 novembre 1891 (non publiée), M. Tourtay a retrouvé des équations de même forme pour une chaussée en chaînette aplatie.
Voir aussi : « *Notice sur la Construction du Pont Boucicaut* », par M. Tourtay.
Annales des Ponts et Chaussées, octobre 1892, p. 482 et suivantes.

Intrados : $$1 + \frac{k}{b}\, y = \frac{1}{2}\left[\omega^{\frac{x}{a}} + \omega^{-\frac{x}{a}}\right]$$

Extrados : $$y' = y\, \frac{\gamma - \frac{k}{b}(p + \gamma e_0)}{\gamma - \gamma'}$$

Pression moyenne à la clef en kg/1^{mq} $$\beta_0 = \frac{(p + \gamma\, e_0)\,(k + 2)}{\text{Log. nep.}\; \dfrac{\gamma - \gamma'}{\gamma - \dfrac{p + \gamma\, e_0}{b}\, k}}$$

M. Tourtay a appliqué ses formules à nombre de grandes voûtes très minces [16].
M. de Tedesco en a donné des tables et des graphiques [17].

§ 3. — *MÉTHODE DE M. LEGAY*

M. Legay [18] retrouve d'abord pour la voûte infiniment mince la projection de chaînette, qu'il appelle « caténoïde » [19].

$$y = \frac{h_0}{2}\left\{ e^{\frac{x}{\sqrt{\frac{H}{\gamma}}}} + e^{-\frac{x}{\sqrt{\frac{H}{\gamma}}}} - 2 \right\}$$

Puis, il passe à une voûte d'épaisseur finie; il la suppose d'abord articulée aux reins et à la clef, en détermine la courbe de charge et la remplace par une horizontale équivalente, à h_0 au-dessus de la clef.

Il détermine h_0, soit par essais successifs, ou mieux comme suit : il suppose la voûte en caténoïde avec h_0 arbitraire, cherche la courbe de pression passant par les milieux de la clef et des naissances, exprime que pour $x = \frac{2\,a}{3}$ la courbe de pression et la caténoïde ont même ordonnée : cette relation donne h_0.

La caténoïde, fibre moyenne, et la courbe de pression, déjà communes à la clef et aux naissances, se coupent ainsi pour $x = \frac{2\,a}{3}$ point où, en général, le centre de pression est le plus loin de la fibre moyenne.

16.

Dates	Ponts (en arcs très surbaissés)	Nombre d'arches	Portée	Surbaiss^t	
1888-1890	Boucicaut, sur la Saône (α)	5	40^m	1/8	α. Intrados en projection de chaînette.
1897-1899	d'Iguerande, sur la Loire (β)	7	28^{m}60	1/7,62	β. Intrados en arc d'anse de panier ayant à la clef et aux retombées les rayons de la projection de chaînette.
1898-1899	de Lays, sur le Doubs (β)	5	26^m	1/7,47	
1900-1904	d'Arciat, sur la Saône (α)	7	31^m	1/7,12	
1904-1908	de Digoin, sur la Loire (β)	9	26^m	1/7,4	

17. — *Tables et graphiques pour le calcul des arches surbaissées en maçonnerie, d'après la méthode de M. Tourtay.* — Paris, Baudry, 1891.

18. — « *Méthode sur le tracé et le calcul des voûtes en maçonnerie* » par M. Legay, Ingénieur des Ponts et Chaussées.
Annales des Ponts et Chaussées, 4e trimestre 1900.

19. — On avait, précédemment, appelé caténoïde la surface engendrée par une chaînette tournant autour de sa base.
« *Les fonctions elliptiques et leurs applications* » par Alfred-George Greenhill. Traduit de l'anglais par J. Griess, Paris, Carré, 1895, p. 138.
C'est un cas particulier des « élassoïdes », étudiées par Ribaucour, Ingénieur des Ponts et Chaussées (mort en 1893).

Pour réduire encore l'écart dans les voûtes peu surbaissées $\left(\sigma > \frac{1}{4}\right)$, il prend comme courbe d'essai la caténoïde, déterminée comme plus haut, puis la rectifie par une funiculaire passant par les milieux de la clef et des naissances.

M. Legay adopte comme fibre moyenne la « caténoïde » de la voûte supposée articulée : comme elle ne l'est pas, la courbe de pression ne coïncide plus avec elle : il calcule les écarts des deux courbes et les trouve faibles.

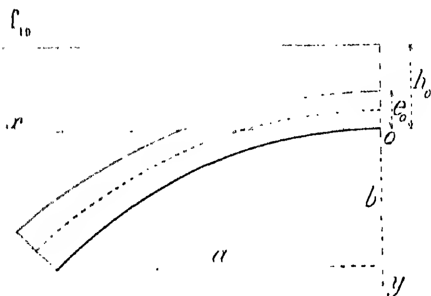
Il a donné des tables permettant de calculer, suivant la portée et le surbaissement, les éléments des caténoïdes.

Il a appliqué ses formules au pont d'Orléans [20].

§ 4. *MÉTHODE DE TOLKMITT* [21, 22]

Cette méthode est très usitée en Allemagne, en Autriche.

Tolkmitt prend comme fibre moyenne la funiculaire des poids morts et de la 1/2 surcharge, passant par les milieux de la clef et des retombées.



Il trouve entre x et y (de l'intrados) une équation fort compliquée que l'on résout à l'aide de tables numériques qu'il donne, mais que, fort judicieusement, il remplace avec très peu d'écart, par une équation de la forme suivante, qui est simple et pratique :

$$y = \frac{m x^2}{a^2 \dfrac{b+m}{b} - x^2}$$ (courbe étudiée p. 337).

Soit ρ_0 (rayon de courbure à la clef) $= \dfrac{a^2}{2\, b\, m}(b+m)$.

La courbe peut s'écrire :

$$y = \frac{x^2}{2\rho_0 - \dfrac{2\, b\, \rho_0 - a^2}{a^2\, b} x^2}.$$

Soit encore h_0 la charge sur la clef, exprimée en hauteur de maçonnerie

Tolkmitt établit les deux formules :

$$\rho_0 + e_0 = \frac{a^2}{4\, h_0}\left[\frac{h_0}{b} + \frac{1}{8} + \frac{2\, e_0\, h_0}{a^2}\sqrt{\left(\frac{h_0}{b} + \frac{1}{8} + \frac{2\, e_0\, h_0}{a^2}\right)^2 + \frac{8\, e_0\, h_0}{a^2}}\right]$$

$$\mathrm{H}\left(\begin{array}{l}\text{poussée horizontale à la clef sur 1 m. de largeur de}\\ \text{voûte, composante horizontale constante de l'effort sur}\\ \text{chaque section — en kg.}\end{array}\right) = (\rho_0 + e_0)\, h_0\, \gamma \left(\begin{array}{c}\text{poids en kg d'un m. c.}\\ \text{de maçonnerie.}\end{array}\right)$$

Si on se donne la poussée par m. q. à la clef β_0 :

$$\mathrm{H} = e_0\, \beta_0$$

20. — Tome III, p. 255.

21. — « *Leitfaden für das Entwerfen und die Berechnung gewölbter Brücken* », von G. Tolkmitt, Königlicher Baurat (3e édition, Berlin, Wilhelm Ernst et fils, 1912).

22. — Mort en 1900.

§ 5. *OBSERVATIONS SUR TOUTES CES MÉTHODES*

Toutes ces méthodes, d'ailleurs fort ingénieuses, reposent sur des hypothèses qui ne laissent pas de prêter à la critique.

Pour une très grande voûte, il est plus sûr, plus clair, de construire ses courbes de pression, puis de tracer un intrados et un extrados qui les encadrent au mieux.

On a dit ceci au Chapitre I : il est bon de le redire.

CHAPITRE IV

UN ARC EST DIT ÉLASTIQUE QUAND LES DÉFORMATIONS Y SONT PROPORTIONNELLES AUX EFFORTS (*Hypothèse de Hooke*), ET QU'UNE SECTION PLANE RESTE PLANE APRÈS FLEXION (*Hypothèse de Navier*). DANS QUELLES LIMITES EST-CE VRAI POUR LES VOÛTES, ET A-T-ON LE DROIT DE LES CALCULER COMME ÉLASTIQUES ?

§ 1. *EXPÉRIENCES DE LABORATOIRE*

POUR LES VOÛTES EN PIERRE, IL N'Y A PAS, A PROPREMENT PARLER, DE COEFFICIENT D'ÉLASTICITÉ, C'EST-A-DIRE QUE, POUR ELLES, L'HYPOTHÈSE DE HOOKE EST FAUSSE.

Pour qu'on puisse supposer les voûtes élastiques, c'est-à-dire pour qu'il soit permis de leur appliquer les formules de déformation, il faut tout d'abord que le coefficient d'élasticité E soit constant pour un même « matériau » sous tout effort inférieur à la limite d'élasticité ; puis, pour la pratique du calcul, qu'il soit le même, non seulement pour chaque matériau, mais tout le long de la fibre moyenne, au moins pour chaque tranche, à condition de tenir alors compte de ses variations de tranche à tranche.

Or, toutes ces hypothèses sont fausses.

Pour chaque « matériau » de voûte (moellon, mortier, béton), le coefficient d'élasticité varie avec l'effort. [23]

Il varie entre deux pierres de même carrière et de même préparation, entre deux briques de même fournée, entre deux bétons de même composition et même âge. [24]

Toutefois, il est à peu près le même à la traction pour les bonnes marques de ciments lents [25].

23. — M. C. Bach a fait de très nombreux essais. Voici, d'après quelques-uns d'entre eux, la valeur de :

$$\varepsilon = \frac{E\,(\mathrm{Kg.}/_{1^{mq}})}{10^{0}} = \frac{\beta(\text{travail en } \mathrm{kg}/\overline{0^{m}01^{2}})}{10^{5} \times \frac{\Delta\, l}{l}}.$$

(On a écrit en italique ce qui concerne les essais à la traction.)

Matériaux essayés.	Résistance à la rupture ($\mathrm{kg}/\overline{0^{m}01}^{2}$) (mesurée sur des cubes)	Entre les efforts β ($\mathrm{kg}/\overline{0^{m}01}^{2}$)	ε	Sources
Ciment Portland pur — 83 jours.		0k — 8k 31,8 — 39,8	2,12 1,67	*Versuche über die Elastizität und Druckfestigkeit von Körpern aus Zement, Zementmörtel und Beton,* von C. Bach. (Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1896, p. 1381.)
Mortier de ciment 1.3.	191k7	0 — 8 32,1 — 40,1	2,38 1,62	
Béton 1 — 2½ — 5.	137,7	0 — 7,9 31,7 — 39,6	3,32 2,07	
Béton 1 — 5 — 10.	106,8	0 — 7,9 31,6 — 39,5	2,58 1,52	
Granit.	1006	0 — 13,8 27,5 — 41,3 137,7 — 165,2	1,66 1,23 2,19	*Untersuchung von Granit inbezug auf Zug-, Druck-, Biegungs-, und Schubfestigkeit, sowie in Hinsicht auf Zug-, Druck-, und Biegungs-Elastizität,* von C. Bach, (Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1897. p. 241.)
	45,4	*0 — 4,8* *19,4 — 29,2*	*2,3* *0,6*	
	1597	0 — 14,6 76,6 — 89 126,1 — 163,3	4,67 3,97 4,03	*Versuche zur Ermittelung der Zusammendrückung (Elastizitätsversuche) und der Druckfestigkeit,* von C. Bach. (Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. 1903, p. 1445.)
Marbre.		0 — 24,25 48,29 — 72,23	1.61 2,79	*Elastizität und Festigkeit.* von Dr. Ing. C. Bach (Fünfte vermehrte Auflage). Berlin, J. Springer, 1905, p. 67 et suivantes
		0 — 3,6 *10,8 — 14.4*	*1,40* *0,69*	
Grès.		*0 — 4,2* *12,3 — 16,3*	*0,93* *0,21*	*Zur Frage der Proportionalität zwischen Dehnungen und Spannungen bei Sandstein,* von C. Bach. (Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, 1900, p. 1169.)
		0 — 4,35 *12,8 — 17*	*0,48* *0,17*	

La **compression** β augmentant, ε a diminué pour le ciment, le mortier, le béton, le grès, suivant une loi exprimée par la formule $\frac{K}{\beta^{n}}$. K constante, n autre constante <1.

Pour le granit, ε décroît d'abord, puis augmente; pour le marbre, il augmente.

La **traction** β augmentant, ε diminue pour le marbre et le grès.

24. — Expériences autrichiennes :
(Voir plus loin § II, art. 2.)

$$\varepsilon = \frac{E\,(\mathrm{kg}/\overline{0^{m}01}^{2})}{10^{5}}$$

	Dosage: Ciment	Dosage: Sable	Dosage: Pierre cassée	à la traction	à la compression
Grès					1,37 à 2,71
Briques					0,45 à 1,62
Béton	1	3	5	0,98	0,74
	1	2	3	2,80	
	1	1	1	2,50	2,64

Bericht des Gewölbe-Ausschusses des Oesterr. Ingenieur und Architekten, - Sonderabdruck aus der Zeitschrift der Oesterr. Ingenieur und Architekten Vereines, 1895, p. 41, 42.

25. — Pour la pâte pure, d'âge variant de 28j à 106j, ε augmente de 1,8 à 3. Quand il est 1,8 pour la pâte pure, il atteint 2,1 pour le mortier à 600k et le béton à 1000k (1v - 1v).
Expériences faites par le Service des Phares et Balises sur la résistance et l'élasticité des ciments Portland, M. de Joly, Ingénieur des Ponts et Chaussées. (Annales des Ponts et Chaussées, 1898, 3e trimestre, p. 198 à 242).

Il n'est pas le même à la compression et à la flexion [26].

La proportion de mortier, la nature et la taille des voussoirs, sont différentes dans les bandeaux, la douelle et le queutage ; dans sa section transversale, la voûte est hétérogène : il est impossible de déduire du coefficient d'élasticité de chaque « matériau » d'une voûte, le coefficient d'élasticité moyen de la voûte [27].

On exécute les grandes voûtes par rouleaux, par tronçons, avec clavages matés, sur des cintres qui se déforment : même homogènes comme matériaux, faites, elles ne le seraient plus.

Enfin, on ne peut pas calculer de même une voûte en matériaux bien réguliers, à joints minces, et une voûte en béton, masse homogène sans joints.

Voilà bien des objections à l'application aux voûtes des formules de déformation.

Dans quelle mesure l'ont confirmée ou infirmée les trop rares observations faites sur les voûtes ?

26. — M. Mesnager : « *Cours de Matériaux de Construction* » professé à l'Ecole des Ponts et Chaussées, 4e Partie : « *Pierres de Construction* », p. 68 et 72.

Expériences faites au Laboratoire de l'Ecole des Ponts et Chaussées :

	Coefficient d'élasticité à la compression	Coefficient d'élasticité à la flexion
Calcaires — Marbre blanc	6,06	7,31 à 8,02
Calcaires — Pierre de Tonnerre (Yonne)	2	2,98 à 3,52
Terres cuites	0,40 à 0,65	0,52 à 2,70

27. — Voici quelques coefficients d'élasticité moyens de maçonneries :

Dans des essais sur des arcs en briques, M. de Perrodil avait trouvé pour $\frac{E\ (Kg/\overline{0,01^2})}{10^5} = \varepsilon$: 0,19, 0,3.

Annales des Ponts et Chaussées, août 1882, p. 119. — La Commission des Annales observe que les déformations ont été excessives.

Dans leurs essais, indiqués plus loin (§ II, Art. 2 - *D*), les Ingénieurs autrichiens ont trouvé :

	Voûte	Matériaux de la voûte
Voûte en moellons ordinaires	0,604	1,37 à 2,71
Voûte en briques	0,278	0,45 à 1,62
Voûte en béton	2,46	

Des déformations observées à l'arche en pierre de taille de Souppes, M. Résal a déduit $\varepsilon = 2,5$.

« *Ponts en Maçonnerie* », Tome I, p. 49, Baudry 1887.

Pour les tours de phares, avec $\varepsilon = 3$, M. Ribière a retrouvé, à peu près, les durées des périodes de vibration enregistrées par son oscillographe.

Annales des Ponts et Chaussées, 1er trimestre 1905, p. 24.

La même valeur $\varepsilon = 3$ correspond encore à la flexion de 4mm d'une pile de 44m05 de hauteur du viaduc de la Sumène, pendant l'arrêt brusque d'un train subitement serré à bloc.

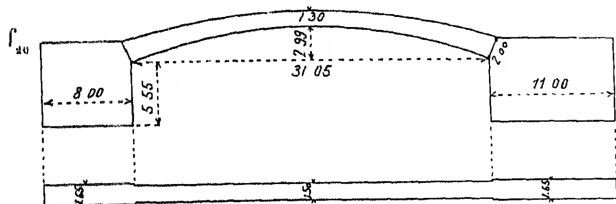
Annales des Ponts et Chaussées, janvier-février 1910, p. 64 : « *Note sur la construction du viaduc des Fades, ligne de Saint-Eloy à Pauniat* », M. Virard.

M. Boisnier, en comparant deux mouvements à peu près égaux des voûtes du pont de Constantine (Tome II, p. 107), la contraction de l'arc sous une pression de 12k, sa dilatation pour $\tau = 9^\circ$ avec $\alpha = \frac{7}{10^6}$ a trouvé : $\varepsilon = 2$.

Annales des Ponts et Chaussées, mai-juin 1912, p. 505.

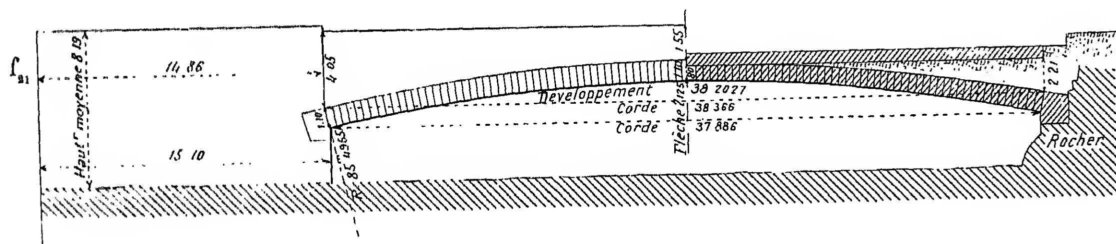
§ 2. — *EXPÉRIENCES SUR DES VOÛTES*[28]

Art. 1. — Arceau d'essai de Vassy (arc de 31m05 à 1/10,37), en moellons ordinaires dressés en coupe, mortier de ciment (1845-1846) (f_{20}). Épreuves au choc (30 mai 1846)[29].



2762k tombant de 27cm, puis de 37cm, produisent, des oscillations estimées 2cm, non mesurées.

Art. 2. — Expérience faite dans les carrières de Souppes (Seine-et-Marne) (1865-66). Arc de 37m886 au 1/18e, de 3m50 de largeur (f_{21}). Dépenses : 33.583 fr.[30]



A. - Voûte. — Voûte en pierre de taille avec lits et joints parfaitement plans. Mortier à 600k de ciment pour 0mc800 de sable. Joints de 12mm ; ceux des naissances fichés les derniers.

La voûte a été exécutée du 26 octobre au 14 novembre 1864, décintrée le 15 mars 1865.

28. — Je rappelle, pour ordre, les expériences de Boistard de 1796.

Avant de construire le pont de Nemours (fondations 1796-97, voûtes 1803), il éprouva 22 voûtes de divers intrados, ayant toutes une portée de 8 pieds (2m60), une épaisseur uniforme de 4 pouces (0m11), en voussoirs égaux, composés chacun de deux briques polies au grès sur une face, jointes au plâtre sur l'autre ; — pas de mortier entre les voussoirs.

« *Expériences sur la stabilité des voûtes* » par L. C. Boistard, Ingénieur en Chef du Corps impérial des Ponts et Chaussées (Recueil de divers Mémoires extraits de la Bibliothèque impériale des Ponts et Chaussées, publié par P. C. Lesage, Ingénieur en Chef de 1re classe, — Paris, Firmin-Didot, 1810, IIe Partie, p. 171 à 217, Pl. XI à XVI).

Les voûtes éprouvées par Boistard ne ressemblent guère aux voûtes usuelles, à mortier, à épaisseur croissante à partir de la clef.

29. — Notice de Belgrand, alors Ingénieur ordinaire des Ponts et Chaussées, du 22 octobre 1846, dans le dossier de l'arche d'essai de Souppes (exécutée 20 ans plus tard).

Service de la Navigation de la Seine (2e section) et des Ponts de Paris, — Archives (carton 30, dossier 3).

30. — « *Notice sur la construction d'une arche d'essai très surbaissée* » par M. Féline-Romany, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

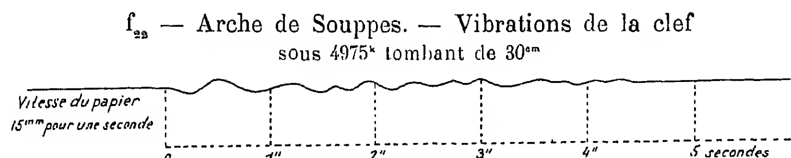
Annales des Ponts et Chaussées, Tome XII, série 4, juillet et août 1866, p. 10 à 17, Pl. 124.

B. - ***Essais*** [31]. — Sous une charge uniforme par m. q. de 681^k et 656^k, la clef s'abaissa de 8^{mm} et 9^{mm} : la charge enlevée, plus d'abaissement.

Au passage d'un chariot de 5510^k, dont 4975^k sur l'essieu d'arrière, la voûte, déjà chargée à 656^k par m. q., fléchit dès l'entrée du chariot, s'abaisse de 0^{mm}3 au passage sur la clef, puis reprend sa position.

4975^k tombant de 30^{cm} font une oscillation de 2^{mm}8 à la clef (f_{22}), 0^{mm}6 au plus aux reins.

f_{22} — Arche de Souppes. — Vibrations de la clef
sous 4975^k tombant de 30^{cm}



Cette voûte homogène, en pierre de taille, s'est comportée comme un arc élastique.

Art. 3. — Observations aux ponts de Lavaur et Antoinette et au pont de Morbegno. — Se sont aussi comportées comme des arcs élastiques :

Sous les trains, les voûtes de Lavaur [32] et Antoinette [33] ;

Sous un changement de température, celle de Morbegno [34], c'est-à-dire que les formules « de déformation » s'y sont appliquées [35].

Art. 4. — Expériences de l'Association des Ingénieurs et Architectes autrichiens (1890-1891) [36].

A. - *Voûtes essayées.* — Ce sont les premiers essais faits pour vérifier l'application aux voûtes des formules « de déformation ».

Je laisse de côté ceux sur arcs en béton armé et en métal.

On a essayé :

7 voûtes de 1^{m}35 et 7 de 2^{m}70, — 3 de 4^{m}05 ; 1 de 10^m au 1/10 en béton ; — 3 de 23^m en arc surbaissé à 1/5 (portée 23^m, flèche 4^{m}60, largeur 2^m), savoir :

une en moellons ordinaires de grès, de 0^{m}60 à la clef, 1^{m}10 aux retombées (mortier : ciment 1^v, sable 2^{v}6) ;

une en briques, même mortier, mêmes épaisseurs ;

une en béton de 0^{m}70 d'épaisseur uniforme : noyau à 1^v - 3^v - 5^v ; intrados et extrados : 1^v - 2^v - 3^v, 1^v - 1^v - 1^v, là où, sous une surcharge dissymétrique, on prévoyait des efforts de traction.

31. — « *Note sur l'arche d'essai des carrières de Souppes* » par M. de Lagrené, Ingénieur des Ponts et Chaussées.
Annales des Ponts et Chaussées, Tome XVI, 4e série, août 1868, p. 130 à 146, Pl. 170, 171.

32. — Tome II, p. 143, 144. 33. — Tome II, p. 149. 34. — Arc semi-articulé, Tome IV, p. 65.

35. — Pour 34° d'écart, le mouvement de la clef a été de 33^{mm}.
En calculant la voûte avec les formules de déformation d'un arc élastique, M. Guidi, pour une variation de 34° et le coefficient de dilatation $\alpha = 8 \times 10^{-6}$ a trouvé 37^{mm}.
« *Influenza della temperatura sulle costruzioni murarie* », Camillo Guidi, Turin 1906, p. 9.

36. — Source indiquée au renvoi 24.

Les deux voûtes en béton (celle de 10^m, celle de 23^m) étaient posées aux naissances sur plaques d'asphalte : elles étaient donc un peu articulées en deux points. On ne pouvait pas en conclure grand'chose pour les voûtes inarticulées.

B. – Conclusions de M. le Professeur Brick. — Voici les conclusions qu'a dégagées des expériences l'un des rapporteurs, M. le Professeur Brick :

1. — Pendant les premières charges, avant les premières fissures, les déformations des axes des voûtes ont augmenté à peu près proportionnellement à la charge.

2. — La charge dépassant une certaine valeur « critique », il se produit des fissures, là où la tension dépasse : soit, dans les voûtes appareillées, l'adhérence du mortier au moellon ; soit, dans les voûtes en béton, la résistance à l'extension du béton.

3. — Dans les voûtes appareillées, les fissures suivent le joint ; dans les voûtes en béton, elles sont irrégulières et se ramifient.

4. — Elles se produisent au 1/4, au 1/3, aux 2/3, aux 3/4 de la portée, et aux retombées ; en général, là où le calcul, fait dans l'hypothèse élastique, indique des sections dangereuses.

5. — Au moment où apparaît la fissure, la fibre moyenne ne change pas brusquement de forme.

6. — Les fissures ouvertes, la voûte ne résiste plus à la tension ; mais elle continue à tenir par sa résistance à la compression, laquelle est beaucoup plus grande. La charge de rupture a dépassé la charge critique de 30 % pour la maçonnerie ordinaire, 59 % pour les voûtes en briques, 31 % pour les voûtes en béton. C'est très heureusement la résistance à l'écrasement qui mesure la résistance de la voûte.

C. — Ce qu'il faut retenir. — En résumé, tant qu'il n'y a pas eu tension, et pour les premières surcharges, les voûtes paraissent, en général, s'être comportées comme des arcs élastiques.

C'est à cette modeste conclusion qu'aboutissent, en somme, ces expériences si vantées[37].

Il y avait peut-être plus à apprendre de l'essai de Souppes, plus vieux de 25 ans.

37. — L'Association des Ingénieurs et Architectes autrichiens a institué une deuxième « Commission des voûtes » (Gewölbe-Ausschuss). Elle a publié deux rapports :

1° - 4 avril 1900 : « *Elasticité et résistance de prismes en pierre de taille, moellons, béton, béton armé, briques creuses et ordinaires, chargés suivant leur axe et excentriquement* ».

Zeitschrift des Œsterr. Ingenieur und Architekten Vereines. (Supplément au n° 25 de 1901).

2° - avril 1910 : « *Voûtes de bâtiments en arc, en béton, béton armé, briques, appuyées sur des poutres en I.* »

Vienne, — Edition de l'Association.

Art. 5. — Insuffisance des observations faites sur les voûtes. — D'observations continues, — j'entends pendant plusieurs années, — sur une voûte, je n'en sais pas.

Comment, depuis sa pose sur le cintre, s'accroît jusqu'au décintrement, puis jusqu'à l'achèvement de l'ouvrage, le travail d'un voussoir ; comment il varie ensuite avec les surcharges, la température, le soleil, l'imbibition ; comment, en un mot, à un moment quelconque, travaille chaque point d'une voûte, — tout cela nous ne le savons pas beaucoup mieux que les ingénieurs de Trajan.

Il y a plus de 2000 ans qu'on fait des voûtes, et l'on n'a pas encore un appareil simple, pratique, sûr, à mettre en toutes mains, permettant à toute époque de mesurer le travail, non pour de courtes périodes : décintrement, passage d'un train (ces instruments-là, on les a), [37 bis] mais après des années.

Si on avait un « baromètre » enregistrant continuement les pressions en chaque point d'une voûte, on n'imaginerait plus, on saurait.

§ 3. — *QUELQUES AUTRES INDICATIONS DE L'ÉLASTICITÉ DES MAÇONNERIES*

Art. 1. — Chute des arches du pont de Vernon [38]. — Le 14 octobre 1870, on fit sauter l'arche de rive gauche du pont de Vernon sur la Seine. Les piles voisines s'inclinèrent l'une après l'autre vers la rive gauche, laissèrent tomber les arches, puis se redressèrent, et reprirent à peu près leur ancienne position, avec si peu d'avaries qu'on appuya sur elles les nouvelles voûtes.

Art. 2. — Oscillations des phares sous les coups de vent. — Les tours des phares oscillent sous les coups de vent comme des tiges encastrées à leur pied [39].

37 bis. — Récemment, M. Mesnager, Professeur à l'École des Ponts et Chaussées, a rendu visibles, à l'aide de la double réfraction, les lignes d'égal travail, dans un modèle réduit en verre.
Annales des Ponts et Chaussées, 1913, juillet-août, p. 135.

38. — 7 arches en anse de panier de 8m25 de flèche, 26m d'ouverture pour les 5 arches centrales, 28m pour les deux arches de rive ; piles de 3m50 d'épaisseur aux naissances fondées sur pilotis. Pont construit en 1858-1862.
Annales des Ponts et Chaussées, 1874, 2e semestre : « *Pont de Vernon* » M. Picquenot.

39. — Voici quelques déplacements observés :

Phare	construit en :	Amplitude des déplacements	Hauteur du phare
de la Coubre	Pierre calcaire de moyenne qualité, de petit appareil.	1mm5	48m5
des Baleines	Pierre de taille calcaire de bonne qualité, de grand appareil.	1mm5	47m
de Barfleur	Pierre de taille granitique de moyenne qualité, de grand appareil.	0mm5	66m
du Planier	Maçonnerie brute de moellons calcaires de très bonne qualité, — plus épaisse et beaucoup plus rigide que les précédentes.	Amplitude imperceptible	54m
de l'Ile Vierge (Ancien et nouveau)	Maçonnerie brute en moellons de granit avec parements extérieurs en pierre de taille granitique.	Amplitude imperceptible	28m et 70m
de la Canche	Briques tendres de médiocre résistance, peu épaisses. Tour très légère avec cassure générale de haut en bas.	4mm	48m
de Calais	Briques tendres. Cassure générale de haut en bas.	2 à 3mm	47m

Annales des Ponts et Chaussées, 1er trimestre 1905, p. 24 : « *Oscillations des tours de phares* », par M. Ribière, Ingénieur en Chef du Service central des Phares et Balises.

Art. 3. — Évasement du haut des nefs de cathédrales. —

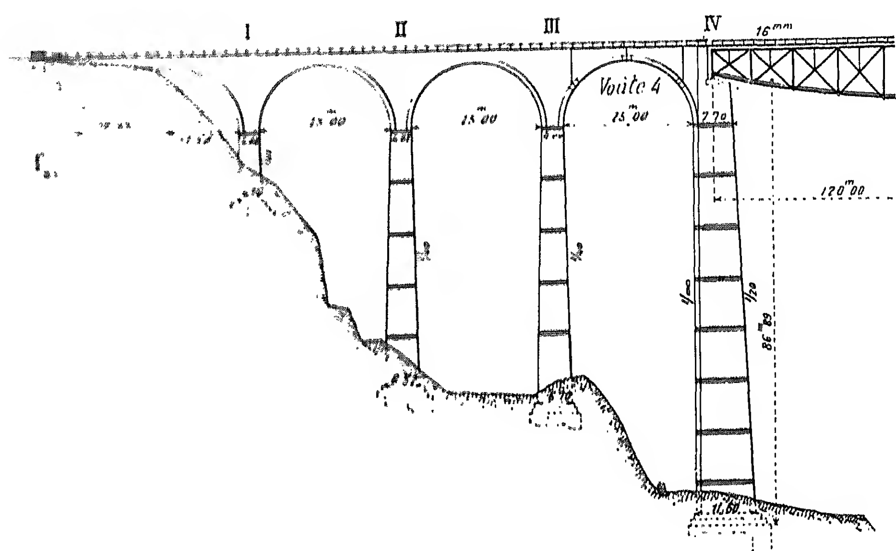
Dans nombre de cathédrales (Laon [10], Bourges, Amiens, Reims, Dijon...), on observe qu'au-dessus des chapiteaux, les piliers s'inclinent vers le dehors [11].

On n'a pas voulu ce déversement : il est dû à la poussée des grandes voûtes de la nef.

Après, l'ensemble tient.

Art. 4. — Courbure élastique des piles IV et III du viaduc sur la Sitter (f_{21}). 1908-1910. (Ligne du lac de Constance au lac de Zurich).

La naissance de la pile-culée IV se déplaça horizontalement, vers la vallée :



de 45^{mm} jusqu'au clavage de la voûte 4 ; de 95^{mm} du clavage à l'achèvement ; en tout de 140^{mm} [12].

Pendant que la pile IV s'écartait de 45^{mm}, l'ouverture de la voûte 4 augmentait de 20^{mm} : la pile III s'est déversée vers la vallée, de : $45^{mm} - 20^{mm} = 25^{mm}$.

Sous les tympans, la clef de la voûte 4 baissa de 80^{mm}, sa portée s'accrut de 70^{mm} pour un déversement de 95^{mm} de la pile IV, soit, pour la pile III, un nouveau déversement de $95^{mm} - 70^{mm} = 25^{mm}$; en tout 50^{mm} [13].

10 A Notre-Dame de Laon, « .....*le hors d'aplomb des colonnes varie, depuis les extrémités de la* « *nef jusque vers son milieu, de 8, 10, 12 et 15 centimètres, mesuré du sol jusqu'aux chapiteaux, et de* « *25 centimètres en sens inverse, depuis les chapiteaux jusqu'à la naissance des voûtes.*

« *Les murs forment donc exactement le genou.....*

« *Chose remarquable, un déplacement aussi considérable des murs s'est opéré sans désunions sensibles* « *dans les constructions. On n'aperçoit, ni dans les grandes voûtes supérieures de la nef, ni dans les voûtes* « *latérales des galeries, de ruptures graves qu'on doive rapporter à ce mouvement.* »

Exposition universelle de Vienne, 1873 : « *Les Monuments historiques de France* », — Paris, Imprimerie nationale, MDCCCLXXVI. Rapport de M. Biet, Inspecteur Général des Bâtiments civils, 20 juin 1846.

11. — Aux viaducs de la ligne d'Issy à Viroflay, M. Rabut a constaté de même que toutes les piles aux naissances s'écartent d'une voûte chargée.

(*Loc. cit.*, Titre II, renvoi 18, p. 348).

12 correspondant à : $\frac{E \text{ (coefficient d'élasticité en } kg/cm^2)}{10^5} = 0{,}5 \left(\begin{smallmatrix}\text{maçonnerie}\\ \text{fraîche}\end{smallmatrix}\right)$

13. « *Der Sitterviadukt der Bodensee-Toggenburgbahn* », von den Ingenieuren A. Acatos, J. Lüchinger, F. Ackermann.

Sonderabdruck aus der Schweizerischen Bauzeitung, Band LVI, 1910 : page 30, IV : « *Beobachtungen während der Bauausführung und der Belastungsproben* », von Ingenieur A. Acatos, St Gallen.

Sous la charge d'épreuve de la travée métallique, la pile IV ne se déplaça que de 2^{mm}; les joints au-dessus des articulations des reins ne s'ouvrirent en haut que de 2^{mm}.

§ 4. — *CONCLUSIONS*

JUSQU'A CE QU'ON EN AIT UNE MEILLEURE,

POUR CALCULER LE TRAVAIL DES VOÛTES,

ACCEPTER, — MALGRÉ SES DÉFAUTS, — L'HYPOTHÈSE ÉLASTIQUE

Les essais, quoi qu'on en ait écrit [44, 45, 46, 47], ne justifient pas l'application aux voûtes des formules de déformation.

Pour les voûtes, on s'est de tout temps beaucoup trop pressé d'édifier des théories[48]. On a tout d'abord raisonné au lieu de regarder, — calculé au lieu de mesurer. On a couru de suite à des hypothèses permettant le calcul, — comme si l'on pouvait trouver quelque chose en dehors de l'expérience[49].

Les voûtes faites de matériaux élastiques sont certainement élastiques, mais non comme l'entend la Résistance des Matériaux : leur élasticité n'est pas si simple.

44. — « *...en se basant sur les essais de rupture et d'élasticité faits sur de grandes voûtes par l'Asso-* « *ciation des Ingénieurs et Architectes autrichiens, il n'est pas douteux qu'on puisse calculer de telles* « *voûtes et déterminer les forces intérieures avec une sécurité suffisante en pratique, en les considérant* « *comme des corps homogènes élastiques...* »
Fortschritte der Ingenieurwissenschaften, zweite Gruppe, 7 Heft : « *Gewölbte Brücken* », von Karl von Leibbrand, — Leipzig, 1897, p. 41 : « *Brücken mit Gelenkeinlagen, I.-Zweck der Gelenke.* »

45. — « *Déjà, depuis quelques dizaines d'années, Winkler, Culmann, Castigliano, et d'autres, avaient* « *entrevu que les voûtes en maçonnerie se comportent comme des solides élastiques, ainsi que l'ont abso-* « *lument confirmé les célèbres (* « *famose* » *) expériences de la Commission autrichienne des voûtes.* »
« *Influenza della Temperatura sulle costruzioni murarie* », p. 6, M. C. Guidi, — Turin, Décembre 1905, — extrait des « Atti della R. Accademia delle Scienze di Torino », vol. XLI, Adunanza del 28 Gennaio 1906.

46. — « *Les classiques expériences de la Société des Ingénieurs autrichiens* » ont établi que les constructions en maçonnerie obéissent aux lois de l'élasticité.
« *I progressi della Scienza e dell' Arte del costruire* », — Discorso inaugurale del 1° Anno 1906-07 del R. Politecnico di Torino, p. 13, M. C. Guidi, — Turin 1906.

47. — « *...les précieuses (* « *verdienstvollen* » *) expériences de l'Association des Ingénieurs et Archi-* « *tectes autrichiens ont établi que les voûtes éprouvées se comportèrent en général comme des arcs élas-* « *tiques et qu'il est, par suite, justifié de calculer comme arcs élastiques des voûtes de même forme et de* « *même construction que les voûtes éprouvées...* »
« *Elastiche Bogenträger* », Dr. Jakob J. Weyrauch, Professor an der Kgl. Technischen Hochschule in Stuttgart. — Stuttgart, Konrad Wittver, 1911, — Préface de la 2ᵉ édition, p. III.

48. — C'est ainsi qu'étaient déjà nées au XVIIIᵉ siècle les théories de La Hire (1712), de Couplet (1729), de Bossut (1770), de Prony (1783), dont Boistard écrit fort justement : « *...il faut l'avouer, tous ces écrits* « *reposent sur une hypothèse qui n'est pas confirmée par l'expérience, en sorte qu'ils doivent être relégués* « *parmi les recherches de pure spéculation, très curieuses à la vérité, mais sans aucune utilité pour la* « *pratique.* »
Boistard, loc. cit., renvoi 28.

49. — « *L'expérience est la source unique de la vérité : elle seule peut nous apprendre quelque chose* « *de nouveau ; elle seule peut nous donner la certitude* ». Qui parle ainsi : un médecin? un physicien? un naturaliste ? — Non, c'est Henri Poincaré, le plus grand mathématicien de ce temps.
H. Poincaré : « *La Science et l'hypothèse* », Paris, Flammarion, 1912, 4ᵉ Partie, Chapitre IX : *Les Hypothèses en physique*, p. 167.

C'est cependant en les supposant telles, que les Ingénieurs autrichiens ont passé de la portée de 41ᵐ du pont de Wäldlitobel[50] à celle de 65ᵐ du pont de Jaremcze[51, 52].

Avec cette hypothèse, on a calculé nombre de grandes voûtes, dont quelques-unes minces, et qui ont tenu[53], des viaducs à arches de 25ᵐ, extrêmement hardis et qui tiennent[54].

Donc, bien que les voûtes ne soient pas des solides homogènes, élastiques au sens de la Résistance des Matériaux ;

que le coefficient d'élasticité y varie d'un point à l'autre, c'est-à-dire qu'à proprement parler il n'y en ait pas, et que les déformations n'y soient pas proportionnelles à la pression ;

que les mouvements du cintre, les matages, y bouleversent les courbes de pression ;

il faut provisoirement continuer à les supposer telles.

On n'a pas, en ce moment, pour le calcul des voûtes, de meilleure hypothèse que l'hypothèse élastique.

50. — Tome II, p. 157. 51. — Tome III, p. 114.

52. — « ...*Si favorables que fussent les circonstances pour construire de grandes voûtes dans la « vallée du Pruth, il eût paru délicat de sauter d'un seul coup de 41ᵐ à 65ᵐ de portée, si les essais de « rupture de voûtes d'épreuves exécutés en juillet 1889 par l'Association des Ingénieurs et Architectes « autrichiens, n'eussent montré déjà que la théorie de l'élasticité appliquée aux voûtes, conduit à des « résultats concordant parfaitement avec l'expérience. Les grandes voûtes de la ligne Stanislau-Woro- « nienka sont le premier résultat qu'a obtenu l'Association des Ingénieurs et Architectes autrichiens par « les voûtes d'épreuve...* »

Zeitschrift des Oesterr. Ingenieur und Architekten Vereines, Tome XLV, nº 42, 20 octobre 1893 : « *Mittheilungen über die « grossen gewölbten Brücken der K. K. Staatsbahn Stanislau-Woronienka* », von Ober-Inspektor Ludwig Huss, Vorstand des Bureaus für Unterbau und Brücken der K. K. General-Direktion der Oesterr. Staatsbahnen.

53. — Voûtes $\geqslant 40^m$ calculées avec l'hypothèse élastique :

Date	Pont de :	Symbole	Portée	Date	Pont de :	Symbole	Portée
	Jaremcze	9	65ᵐ	$19\frac{06}{08}$	Walnut Lane	$\widehat{A}^1\widehat{A}^1\ r^{te}(\geqslant 40^m)^2$	71ᵐ02
$18\frac{93}{94}$	Jamna	$\widehat{A}^1\ F^r(\geqslant 40^m)^{10}$	48ᵐ	$19\frac{07}{09}$	Wiesen	$E^1_h\ f^r\ (\geqslant 40^m)^1$	55ᵐ
	Worochta	11	40ᵐ	$19\frac{08}{09}$	Montanges	$\widehat{A}^1\ r^{te}\ (\geqslant 40^m)^{12}$	80ᵐ29
$19\frac{01}{02}$	Solis	$C^1\ f^r\ (\geqslant 40^m)^1$	42ᵐ	$19\frac{08}{10}$	Lusserat	$\widehat{A}^1\ F^r\ (\geqslant 40^m)^{22}$	45ᵐ
$\frac{1899}{1903}$	Luxembourg	$\widehat{A}^1\widehat{A}^1\ r^{te}(\geqslant 40^m)^1$	84ᵐ65	$19\frac{08}{10}$	Rocky-River	$\widehat{A}^1\widehat{A}^1\ r^{te}(\geqslant 40^m)^3$	85ᵐ34
$19\frac{01}{05}$	Valence	$E^n\ r^{te}\ (\geqslant 40^m)^6$	49ᵐ20	$19\frac{08}{12}$	Sidi-Rached	$\widehat{A}^1\widehat{A}^1\ r^{te}(\geqslant 40^m)^4$	68ᵐ76
$19\frac{03}{05}$	Plauen	$\widehat{A}^1\ r^{te}\ (\geqslant 40^m)^{10}$	90ᵐ	$19\frac{07}{09}$	Lichtensteig	$\widehat{A}^1\ F^r\ (\geqslant 40^m)^{24}$	42ᵐ82
$19\frac{04}{07}$	Amidonniers	$E^nE^n r^{te}(\geqslant 40^m)^1$	46ᵐ, — 42ᵐ, 38ᵐ50	$19\frac{10}{12}$	Krummenau	$\widehat{A}^1\ F^r\ (\geqslant 40^m)^{25}$	63ᵐ26
$19\frac{04}{06}$	Salcano	$\widehat{A}^1\ F^r\ (\geqslant 40^m)^{19}$	85ᵐ	$19\frac{10}{12}$	Cinuskel	$\widehat{A}^1\ f^r\ (\geqslant 40^m)^3$	46ᵐ976
1906	Guggersbach	$\widehat{A}^1\ r^{te}\ (\geqslant 40^m)^{11}$	50ᵐ20	$19\frac{11}{12}$	Tuoi	$\widehat{A}^1\ f^r\ (\geqslant 40^m)^4$	47ᵐ706

54. — Ligne du lac de Constance au lac de Zurich : Viaduc sur la Sitter (Arches d'accès de 25ᵐ de portée, poussant contre une pile-culée de 87ᵐ de hauteur, épaisse en haut de 7ᵐ70, 1908-1910) ; — Viaduc de Weissenbach (63ᵐ de hauteur, 3ᵐ50 seulement d'épaisseur aux naissances, 1908-1910).

Bodensee-Toggenburg-Zurichsee, — Saint-Gall, chez Zollikofer. 1911.

Tout compte fait, acceptons-la donc, non parce qu'elle est vraie, mais parce que des voûtes minces, ainsi calculées, tiennent.

Mais ne l'acceptons que très provisoirement, « *sous bénéfice d'inventaire* « *expérimental* »[55], c'est-à-dire jusqu'à ce que de nouveaux essais établissent d'autres formules qui s'ajustent mieux aux faits.

55. — Expression de Claude Bernard.
« *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* », II-3.

ANNEXE

VOÛTES INARTICULÉES

ÉPAISSEUR A LA CLEF

COEFFICIENT :

$$\alpha = \frac{e_0 \text{ (épaisseur à la clef)}}{\left[1 + \sqrt{2a \text{ (portée)}}\right] \mu \text{ (fonction du surbaissement } \sigma)}$$

$$\mu = \begin{cases} \textit{Pleins Cintres } \mathbf{C} \ldots\ldots\ldots\ldots & 1 \\ \textit{Ellipses (ou Anses de panier) } \mathbf{E} \ldots\ldots & \dfrac{4}{3 + 2\sigma} \\ \textit{Arcs } \mathbf{A} \ldots\ldots & \dfrac{4}{3}(1 - \sigma + \sigma^2) \end{cases}$$

VALEUR DE α POUR 562 OUVRAGES

ENVIRON 3 300 VOÛTES *(TYPES NON COMPTÉS)*

VOIR :

POUR LES VOÛTES $\geqslant 40^m$:

Pleins Cintres **C**, *Ellipses (ou Anses de panier)* **E** . . . . . Tome I

Arcs peu surbaissés $\left(\sigma \geqslant \frac{1}{2\sqrt{3}}\right)$ $\widehat{\mathbf{A}}$ . . . . Tome II

Arcs assez surbaissés $\left(\frac{1}{2\sqrt{3}} > \sigma > \frac{1}{7}\right)$ $\widehat{\mathbf{A}}$ ⎫ . . . . Tome III

Arcs très surbaissés $\left(\sigma \leqslant \frac{1}{7}\right)$ $\bar{\mathbf{A}}$ . . . . . . ⎭

POUR LES VIADUCS : APPENDICE, – Viaducs . . . . Tome V

On a seulement indiqué les matériaux du queutage et le mortier (Ch = Chaux, Cim = Ciment).

Pour le sens des abréviations MOV, MEV, MAV, PT, L, Br, B, voir Tome III, Avertissement, p. 2, n° 6.

L'exposant C^3, C^4 indique le nombre d'arches.

Coefficient $\alpha = \dfrac{e_0 \text{ (épaisseur à la clef)}}{\left[1 + \sqrt{2a} \text{ (portée)}\right] \mu \left(\text{fonction du surbaissement } \sigma\right)}$

α	PONTS SOUS ROUTE						PONTS SOUS CHEMIN DE FER					
							VOIE NORMALE					VOIE ÉTROITE
	C	E	Â	Â	Â	en 2 ann^x	C	E	Â	Â	Â	
0.09												
0.095					*Allemagne*, 1905-08, A^1 – MOV – cim : Ziegenhals, 40^m; Michelau, 42^m; Schwusen, 48^m; Kupferhammer, 48^m.							
0.10					Gross-Kunzendorf, *Allemagne*, A^3, arche centrale 40^m, MOV – cim.							
0.105	Viaduc de Chastellux, *Yonne*, 1876-78, C^{11} – 9^m50, MOV – cim.				Passages supérieurs, A^1, B – cim : *Limoges-Brive*, 1874-75, 15^m; *Nantes-Chateaubriant*, 1875-77, 15^m. Neuhammer, *Allemagne*, Projet : 1905, A^1 – 52^m, MOV – cim. Longuich, *Allemagne*, 1909-11, A^1 – 43^m, B – cim.							
0.11		Toulouse, 1542-1632, E^7 – Arche centrale : 34^m.		sur le Kelvin, à Glascow, *Ecosse*, 1834, A^2 – 27^m45. Seythenex, 1908-11, A^2 – 41^m10, PT – cim.	*Allemagne*, 1903 à 1908, 46^m, B – cim : Mehring, A^1; Schweich, A^3; Trittenheim, A^1.							
0.115				La Brague, *Alpes-Maritimes*, 1900, A^1 – 30^m.	Huzenbach, *Allemagne*, 1880, A^1 – 35^m, PT. Longuich, *Allemagne*, 1909-11, A^1 – Arche centrale : 46^m, B – cim.					Chemnitz *(Allemagne)*, *Chemnitz-Wechselburg*, (Int^t loc.) 1901-02, A^1 – 45^m.		
0.12					Teinach, *Allemagne*, 1882, A^1 – 33^m, PT – cim. Boucicaut, 1888-90, A^5 – 40^m, MAV-cim. Iguerande, 1895, A^7 – 28^m60, MOV-cim. Avignon, 1905-09, A^{10} – 40^m, MAV-cim.							
0.125		*Paris*, E^5 : Bercy, 1863-64, 29^m. Tolbiac, 1879-82, 35^m.		Chester, *Pays de Galles*, 1833-34, A^1 – 60^m96 – ch. Guggersbach, *Suisse*, 1906, A^1 – 50^m20, B – cim.	*Allemagne*, 1904-05, MOV – cim : Wengern, A^1 – 50^m; Krappitz, A^3 – Arche centrale : 50^m. Arciat, Saône-et-Loire, 1906, A^7 – 31^m, MOV – cim.						Etaples, *Amiens-Boulogne*, 1875, 14^m.	
0.13		des Echavannes, *Chalon-sur-Saône*, 1787, E^7 – 12^m99. *Paris*, E^3 – MOV : St-Michel, 1857, 17^m20 – cim. Louis-Philippe, 1860-62, Arche cent^le, 32^m.		Elyria, *Etats-Unis*, 1886, A^1 – 45^m72, L – cim. Plauen, *Saxe*, 1903-05, A^1 – 90^m, MOV – cim. Excideuil, *Nontron-Sarlat*, 1886-87, A^3 – 16^m, MOV – cim.	Passage supérieur, *Civray-Le Blanc*, 14^m.					Zeniebach *(Autriche)*, *Stanislau-Woronienka*, 1893-94, A^1 – 22^m, MOV – cim.		
0.135		Pont au Change, *Paris*, 1858-60, E^3 – 31^m60.			Concorde, *Paris*, 1787-91, A^5 – arches de rive, 25^m33, PT – ch. Passage sup^r, *Preuilly-Tournon-St-Martin*, 1883-86, A^1 – 16^m16, MOV.					Lagunes de Venise *(Italie)*, *Venise-Vicence*, 1841-46, A^{210} – 10^m.		

Coefficient $\alpha = \dfrac{e_0 \text{ (épaisseur à la clef)}}{\left[1+\sqrt{2a} \text{ (portée)}\right] \mu \left(\text{fonction du surbaissement } \sigma\right)}$

	PONTS SOUS ROUTE					PONTS OU VIADUCS SOUS CHEMIN DE FER					
						VOIE NORMALE					VOIE ÉTROITE
)	E	Â	Â	Ā	en deux anneaux	C	E	Â	Â	Â	
	Pont de l'Arche, sur la Seine, 1856-57, E^1 – 30^m[illegible] Pont du Jour, *Paris*, 1864-66, E^1 Partie basse du viaduc du chemin de fer 30^m11, MOV – ch. des Andelys, *Eure*, 1872-74, E^1 – 33^m – cim. Verdun s. le Doubs, 1895-97, E^1 – 32^m et 38^m40, MEV – cim. Edouard VII, *Angleterre*, 1901-03, E^1 – 30^m[illegible] – cim.	[illegible] *Angleterre*, [illegible] A^1 – 27^m35	des Orfèvres, *Florence*, XIVe siècle, A^1 – 28^m80. Montanges, *Ain*, 1908-1910, A^1 – 80^m[illegible], L – cim.	Concorde, *Paris*, 1787-91, A^1 – 28^m26, PT – ch. Digoin, sur la Loire, A^1 – 26^m, MAV – cim. Lays, sur le Doubs, 1895, A^1 – 26^m, MEV – cim. Orléans, 1904-06, A^1 – 33^m85, MAV – cim.	Luxembourg, 1899-1903, $A^1 A^1$ – 84^m65, MAV – cim. Amidonniers, *Toulouse*, 1904-07, $E^3 E^3$ – 46^m et 42^m, MEV – cim.		Malagazanne, *Marvejols-Neussargues*, 1882, E^1 – 12^m – ch.			Bellows-Falls, *Etats-Unis*, 1899, 2 A^1 – 42^m672 – L – cim.	Viaduc de Lantosque, *Vallée de la Vésubie*, *ligne électrique*, C^3 – 22^m, MOV – cim.
	Courcelles sur la Seine, 1820, E^1 – 33^m, MOV – cim.	[illegible] *Angleterre*, 1826, A^1 – 18^m[illegible]	Bellefield, *Etats Unis*, 1896-97, A^1 – 18^m[illegible], B – cim.	Concorde, *Paris*, 1787-91, A^1 – Arche centrale, 31^m18 PT – ch. Ile Verte, sur l'Isère, *Grenoble*, 1808, A^1 – 39^m20, 37^m.	Amidonniers, *Toulouse*, 1904-07, $E^3 E^3$ – 38^m50, MEV – cim.		Mouleydier, *Bergerac - Le Buisson*, 1877-79, E^1 – 10^m20.		Pont sur la Strona *(Italie)*, *Domodossola-Iselle*, 1901-04, A^3 – 15^m, Br – ch.		*Ligne électrique de la Bernina*, 1909, Viaducs en C de 8^m. (Types) Cavagliasco, A^1 – 26^m.
Chambon, sur la Loire *(Haute-Loire)*, 1893-97, C^1 – 28^m – MOV.	Pont du Château, sur l'Allier, [illegible], E^1 – 30^m[illegible] Roanne, sur la Loire, 1789, E^1 – 24^m40. Vernon, sur la Seine, 1871-72, E^1 – 28^m. St Pierre, 1880, E^1 – 40^m – cim. Edmondson-Avenue à Baltimore, *Etats-Unis*, 1908-09, E^1 – 42^m[illegible], B – cim.		Wheeling, *Etats Unis*, 1891-92, A^1 – 48^m16. St Martin Lys, *Quillan-Rivesaltes*, 1897, A^1 – 33^m, MAV – cim.	National, *Paris*, 1852-53, A^1 – 34^m50. Invalides, *Paris*, 1854, A^1 – arches de rive, 31^m87.		Viaducs : des Huttes, *Brioude-Alais*, C – 9^m24. sur la vallée de Pontone *(Italie)*, *Gênes-Asti*, 1889-91, C^{2a} – 12^m, Br – ch. de Lascoumères, *Lannemezan-Arreau*, 1892-93, C^2 – 7^m.				National, *Paris*, pont mixte rte et Fr 1852-53, A^1 – 34^m50.	
	Gloucester, *Angleterre*, 1826-27, E^1 – 45^m72, PT Notre Dame, *Paris*, 1853-54, E^1 – 18^m70, MOV – cim. Vernon, sur la Seine, 1871-72, E^1 – 26^m – cim.		Argentat, sur la Dordogne, 1892-94, A^1 – 42^m04 cim.	Nemours sur le Loing, 1796-1805, A^1 – 16^m24. Invalides, *Paris*, 1854, A^1 – arches centrales, 31^m60. Putney, *Angleterre*, 1882-83, A – 43^m80, PT – cim. Charrey, sur la Saône, 1888, A^1 – 30^m, ch.	Constantine, *Algérie*, 1908-12, $A^1 A^1$ – 67^m57, MA – cim.	sur le Sabato, *(Italie)* *Avellino-S.-Venere*, 1891-92, C^{1a} – 11^m, Br – ch. de Baricave, *Lannemezan-Arreau*, 1893-94 C^2 – 10^m.			Pont sur le Toce *(Italie)*, *Arona-Domodossola*, 1901-1904, A^8 – 25^m, Br – ch.	Roanne, 1858, A^1 – 28^m.	Ramounails, *Villefranche-Bourg-Madame*, 1906-08, A^1 – 40^m30, MEV – cim. Viaducs en C : de 10 à 20^m, *Ligne électrique de la Bernina* ; de 8^m : *Ligne de l'Albula*. (Types).
		Nyons, 1351-1407, A^1 – 40^m53.	Austerlitz, *Paris*, 1854, A^1 – 4 arches centrales, 32^m30. Claix, 1873-74, A^1 – 52^m, MOV – cim. Passage supérieur de Laveix, *Nontron-Sarlat*, 19^m35.	Tilsitt, *Lyon*, 1864, A^1 – 22^m84. Citadelle, *Grenoble*, 1865, A^1 – 23^m10.		de Bouchatel, *Brioude-Alais*, 9^m. de Saint-Denis, *Cahors-Brive*, 1881-87, C^7 – 8^m. du Vair, *Neufchateau-Barisey*, 1888, C^{10} – 11^m. sur le Rio Fraccio, *(Italie)*, *Arona-Domodossola*, 1901-04, C^8 – 10^m, Br – ch.	La Flèche, sur le Loir, *La Flèche-La Suze*, 1875-76, E^2 – 20^m. Marmande, *Marmande-Casteljaloux*, 1880-83, Viaducs d'accès, E^{20} – 20^m. Val de la Loire, *Bourges-Gien*, 1887-92, Viaducs d'accès, E^{20} à 16^m, E^{16} à 15^m, E^{15} à 14^m, E^{10} à 13^m.		Jablonicabach *(Autriche)*, *Stanislau-Woronienka*, 1893-94, A^1 – 25^m, MOV – cim. sur le torrent Cairasca, *(Italie)*, *Domodossola-Iselle*, 1902, A^1 – 32^m, Br – ch. sur le Cervo *(Italie)*, *Santhia-Arona*, 1901-05, A^8 – 18^m, Br – ch.	Pont sur la Louette, *Etampes-Pithiviers*, 1902, A^1 – 12^m.	Viaduc de Malvan, *Alpes-Maritimes*, C^6 – 22^m, MOV – cim. Passage infr, *Guingamp-Paimpol*, 1896, A^1 – 10^m97. Viaducs en C de 25^m, *Bernina* ; de 6^m et 20^m, *Albula*. (Types).

Coefficient $\alpha = \dfrac{e_0 \text{ (épaisseur à la clef)}}{\left[1+\sqrt{2a \text{ (portée)}}\right] \mu \left(\text{fonction du surbaissement } \sigma\right)}$

α	PONTS SOUS ROUTE — C	PONTS SOUS ROUTE — E	PONTS SOUS ROUTE — A (1)	PONTS SOUS ROUTE — A (2)	PONTS SOUS ROUTE — A (3)	PONTS SOUS ROUTE — en 2 ann^x	PONTS OU VIADUCS SOUS CHEMIN DE FER — VOIE NORMALE — C	VOIE NORMALE — E	VOIE NORMALE — A (1)	VOIE NORMALE — A (2)	VOIE NORMALE — A (3)	VOIE ÉTROITE
0.165		Moulins, 1756-64, E^{13} – 19^{m}50. Chatellerault, 1848, E – 20^m. Bléré, sur le Cher, 1898-99, E^6 – 24^m – ch. Empereur-François, *Prague*, 1899-1901, E^4. Plus grande arche : 42^{m}34. PT – cim.			Mosca, à Turin, 1834, A^1 – 45^m, PT – ch.		Ballochmyle, *Ecosse*, 1846-48, C^1 – 55^{m}17. St-Waast, *Montauban-Castres*, 1884-86, C^3 – 20^m, Br – ch. Amélie-les-Bains, *Elne-Arles-sur-Tech*, 1890-92, C^3 – 26^m. Viaducs de · La Lavade, *Rodez-Millau*, 1880, C^1 – 7^m, MOV – ch. Maison-Rouge, *Marvejols-Neussargues*, 1881-83, C^1 – 15^m, MEV – ch. Rio Cammarelle, *(Italie), Sparanise-Gaeta*, 1890-91, C^6 – 15^m, Br – ch. la Selle, *Cie du Nord*, C^8 – 15^m – ch. Vallée d'Avella, *(Italie), Avellino-S. Venere*, 1893-95, C^5 – 15^m, Br – ch. *Lac de Constance-Lac de Zurich, (Suisse)*, 1907-09, Weissenbach, C^5 – 25^m et C^8 – 15^m, MOV – cim. Viaducs de 15^m, 20^m, 22^m, 25^m (Types).	Pont sur la Bidassoa, *Bayonne-Irun*, E^3 – 20^m. Albias, *Montauban-Cahors* 1881-82, E^3 – 23^{m}25 – cim. Grand-Vicq, *Preuilly-Tournon-Saint-Martin*, 1883-86, E^1 – 16^m. Caoue. *Lannemezan-Arreau*, 1891-93, E^2 – 26^m, MOV – ch Verdon, *St-André-Puget-Théniers*, 1900-1902, E^1 – 20^m. Vendes, *Vendes-Mauriac*, 1900-1902, E^1 – 16^m. V^o de l'Eure, *Paris-Chartres*, E^1 – 12^{m}76.	Castelet, 1882-83, A^1 – 41^{m}20, MEV – cim.	*Arona-Domodossola, (Italie)*, 1901-1904, Br – ch : Pont sur le torrent Selvaspessa, A^3 – 25^m. Pont sur le lac de Mergozzo, A^1 – 25^m. — id. — A^2 – 25^m.	Trilport, *Trilport-la-Ferté*, 1893, A – 26^{m}86.	Viaducs en C de 15 à 25^m, *Albula, (Suisse)* (Types).
0.17	Vieux pont de Céret, 1321-39, C^1 – 45^{m}45. Brent, *Suisse*, 1899-1900, C^1 – 44^m, ME – cim.	Londres, 1824-31, E^5 – 46^{m}33. PT. Grenoble, 1839, E^3 – 27^m. Alma, *Paris*, 1854-55, E^3 – arche centrale de 43^{m}38. MOV – cim. Valence, 1901-05, E^4 – 49^{m}20. ME – cim.	Vieux pont de Claix, 1608-11, A^1 – 45^{m}65.	Quimper, *Ch. de fer de Chateaulin*, 1863, 21^{m}54. des Auques, *Montauban-Brive*, 1881-82, A^1 – 23^m	Petit pont, *Paris*, 1852-53, A^1 – 31^{m}75. de la Citadelle, *Grenoble*, 1865, A^3 – 25^{m}04.	Rocky-River, *Etats-Unis*, 1908-10, A^1 A^1 – 85^{m}34. B. et grosses pierres – cim.	Viaducs de : *St-Rambert-Grenoble*, 1855, la Fure, C^{16} – 14^m. *Brioude-Alais*, Chamborigaud, C^{12} – 14^m; Langogne, C^5 – 14^m. *Alais-Le Pouzin*, MOV – ch. : Frayol, C^{11} – 10^m; Truel, C^6 – 8^m, Téoulemale, C^6 – 12^m; l'Auzon, C^{17} – 12^m. *Limoges-Brive*, 1875, la Meyze, C^3 – 18^m; la H^{te}-Vézère, C^3 – 10^m. *Eymoutiers-Meymac*, Martin-Roche, C^{12} – 10^m – ch. *Marvejols-Neussargues*, 1881-84, ch : MOV – 8^m : Chapchiniès, C^1; Maison-Rouge, C^1; Triboulin, C^5; 10^m : Le Lignon, C^{10}; Rimeize, C^{10}; Saillant, C^3; 12^m : Massalès, C^5; MEV – 10^m : La Combe, C^3; Le Blaud, C^8; Varillette, C^{10}. *Cahors-Brive*, 1882-85, 10^m, MOV – ch : Les Marjaudes, C^{14}; Présignac, C^{12}; Sorbier, C^9. *Civray-Le Blanc*, Le Salleron, 1882, C^3 – 10^m. *Poitiers–Le Blanc*, La Caronnière, 1882-83, C^7 – 10^m. *Nontron-Sarlat*, 1885-87, ch.: Nontron, C^7 – 18^m; St-Pardoux, C^4 – 17^{m}94, MOV; Muratel, 1893-95, C^1 – 23^m; Puyredon, C^5 – 8^{m}15. *Bourges-Gien*, Val de la Loire, 1887-92, rive dr., C^{15} – 16^m, rive g. C^{10} – 16^m. *Argenteuil-Mantes*, Triel, 1888-90, C^8 – 5^{m}10, C^1 – 8^m. *Issoudun-St-Florent*, 1890-93 : Bief du moulin de Charost, C^3 – 12^m; sur l'Arnon, C^3 – 11^{m}94, MOV – ch. *Mende–La Bastide*, 1896, Mirandol, C^{10} – 12^m, MOV. *Rome-Viterbe, (Italie)*, Vald'Enfer, 1891, C^{15} – 14^m. *Quillan-Rivesaltes*, 1897-98 : St-Georges, C^9 – 16^m; Mouillèro, C^3 – 16^m; Lapradelle, C^{12} – 12^m. P^{ts} d'Axat, C^1 – 30^m, MEV – ch; d'Aliès, id. *St-Girons-Foix*, Vernajoul, C^{13} – 14^m, MOV – ch. *Nérac-Mont-de-Marsan*, P^t sur le St-Laurent, C^1 – 18^m, MEV – ch. *Arona-Domodossola, (Italie)*, Torrent de Tiasca, 1901-04, C^5 – 10^m, Br – ch. *Lac de Zurich-Lac de Constance, (Suisse)*, Viaducs de 6^m, 8^m, 10^m, 12^m, 30^m (Types).	Le Midou, *Nérac-Mont-de-Marsan*, 1892, E^1 – 20^m, MOV – ch. Dropt, *La Sauve-Eymet*, 1893, E^3 – 15^m. Arrigas, *Tournemire–Le Vigan*, 1895, E^1 – 21^{m}60. Arche elliptique du viaduc de l'Eure, *Paris-Chartres*, E^1 – 25^{m}80.	Victoria, *(Angleterre), Durham-Junction Ry*, 1836-38, A^1 – 48^{m}77. Pont sur la Gelise, 13^m. Pont sur le Tâtre, *Barbezieux-St-Mariens*, 1904, 28^{m}91. Escot, *Oloron-Bedous*, 1907-09, A^1 – 56^m, MEV – cim.	Rouzeix, *Limoges-Brive*, 1875, A^1 – 19^m. Pont sur la Dordogne, *Laqueuille-Mont-Dore*, 1897, A^1 – 28^m, MOV – ch. Canale *(Autriche), Assling-Trieste*, 1904-06, A^1 – 40^m. L – cim. Lusserat, *St-Jean-d'Angély-Saujon*, 1908-10, A^1 – 45^{m}70. MOV – cim.		*Morlaix-Carhaix*, 1893, 2 C – 10^m. sur le Dourcan, 1893, A – 15^{m}78. *Guingamp-Paimpol*, 1896, C – 10^m, 16^m. *Carhaix-Rosporden*, 1897, 2 C – 10^m sur le Launay, 1897, C – 10^m. *Albula, (Suisse)* Viaducs en C de 10^m, 12^m, 30^m, (Types).

PONTS SOUS ROUTE						PONTS OU VIADUCS SOUS CHEMIN DE FER					
						VOIE NORMALE					VOIE ÉTROITE
C	E	A	A	A	60 2 annx	C	E	A	A	A	
	Alma, Paris, 1854-56, E², Arches de rive : 38m50.		Dean, *Ecosse*, 1831, A¹ – 29m. Passage supr de la Bachellerie, *Limoges-Brive*, 1875, A¹ – 28m, B – cim. Cazeneuve, 28m.			Oloron, 1881-1882, C¹ – 40m, MOV – ch. cim.; Rébuzo, 1898-1900, C¹ – 40m, MEV – cim. Viaducs de : *Argenteuil-Mantes*, Triel, 1888-90, C¹ – 9m – ch. *Nontron-Sarlat*, St-Germain-des-Prés, 1890-92, C⁹ – 15m – ch. *Bourges-Cosne*, St-Satur, 1891-93, C²⁶ – 13m – ch. *Mende-La Bastide*, Mirandol, 1896, C⁸ – 6m, MOV. *Espalion-Bertholène*, 1903-05, MEV – ch : Le Plô, C⁷ – 17m; Le Goudal, C⁷ – 12m50. *Briey-Hussigny*, Thil, 1906, C – 6m90. *St-André-Puget-Théniers*, 1905-12 : Le Maouna, C⁹ – 15m, MEV – ch; la Donne, C⁵ – 17m; la Beïte, C¹ – 34m – ch; l'Etroit, C¹ – 15m, MEV; Guillaumasse, C⁵ – 15m, MEV – ch. *Argenton-La Châtre*, La Vauvre, C¹ – 15m. *St-Jean d'Angély-Saujon*, La Boutonne, 1906-07, C⁵ – 9m; Fontcouverte, C⁷ – 9m.	*Bergerac-Le Buisson*, 1876-79, E⁷ – 24 – cim : Trémolat; Alles; Limeuil. *Marmande-Casteljaloux*, Marmande, 1877-81, E⁵ – 36m, MOV – ch. *Mende-Le Monastier*, Rieucros, 1879, E¹ – 21m90. *Civray-Le Blanc*, 1881-86 : Salleron, E¹ – 14m; sur l'Anglin, E³ – 25m. *Cahors-Capdenac*, 1882-84, St-Martin-Labouval, sur le Lot, E¹ – 25m – ch; Masseriès, E⁵ – 23m10 – ch. *Montauban-Cahors*, 1883; Montauban, E⁸ – 25m, MEV – cim. *Tournemire-Le Vigan*, Coudoulous, 1895, E³ – 14m. *Castelsarrasin-Beaumont*, Belleperche, sur la Garonne, 1895-1900, E⁵ – 33m, Br – ch. sur la Big-Muddy, *Etats-Unis*, 1901-03, E³ – 42m67, B – cim.	Antoinette, *Montauban-Castres*, 1883-84, A¹ – 47m396 aux retombées de l'arc – MEV – cim.	Calcio, *Italie*, 1877-78, A¹ – 42m. Pouch, 1890, A¹ – 47m85, MEV – ch. Worochta, *Autriche*, 1893-94, A¹ – 40m, MEV – cim. Diveria, *Italie*, 1901-02, A¹ – 40m, Br – ch. Boïlefos, *Norvège*, 1908, A¹ – 40m, PT – cim. Lichtensteig, *Suisse*, 1910-1912, A¹ – 42m82, MEV – cim. Passage inf. *Etampes-Pithiviers*, A¹ – 16m63.	Pont sur la Corrèze, *Limoges-Brive*, 1875, A³ – 16m.	
			Passage supr d'Eyrisson, *Nontron-Sarlat*, 1894, A¹ – 19m46.	Corneille, *Rouen*, 1810-35, A⁴ – arches centrales, 31m. Archevêché, *Paris*, 1828, A² – arche centrale, 17m00.		Viaducs de : *Nantes - Brest*, 1860-1867, Auray, C¹⁰ – 15m; Guily-Glas, dit aussi de Port-Launay, C¹² – 22m – MOV. *Arvant au Lot*, 1866-67, 8m : Veyrière, C⁵; Saguissoule, C¹. *Alais-Le Pouzin* : sur l'Ardèche, C¹¹ – 16m40. *Rodez-Millau*, 1873-77, MOV : Vezouillac, C⁷ – 16m – cim; Les Terrals, C¹⁴ – 12m. *Marvejols-Neussargues*, Senouard, 1879-82, C⁹ – 18m – MEV-ch. *Queroy-Nontron*, Le Bandiat, 1882-83, C⁶ – 10m – ch. *Aurillac-St-Denis*, 1883-84 : 12m : la Cère, C⁷ – ch; l'Auze, C⁸. *Montauban-Brive*, 1882-86, ch. : Lamouroux, C⁹ – 10m; Planche-Torte, C¹⁵ – 10m; Lignyroux, C⁸ – 9m90. *Argenteuil-Mantes*, 1888-90, ch, C⁸ : Meulan, 18m70; Bas Vals, 20m. *Bourges-Cosne*, 1890-93, 10m : Thauvenay, C³; Ménétréol, C²⁸ – ch. *Avellino-S. Venere, Italie*, Pt biais sur le Calore, 1889-93, C⁵ – 12m – Br – ch. *Gênes-Asti, Italie*, 1891-92, 12m – Br – ch : Pt biais sur la Stura, C⁵; Pt sur la Bormida, C¹⁸. *Carmaux-Rodez*, 1892-95, C⁷ – 10m : Ledas, ch; la Mouline, MEV. *Nantes-Châteaulin*, Daoulas, C¹⁵ – 18m. *Nontron-Sarlat*, 1893-95 : Moulin-Neuf, C⁶ – 10m – ch; Muratel, C⁶ – 8m. *Tournemire-Le Vigan*, Trémouls, 1895, C³ – 7m. *Civray-Le Blanc*, 1881-86 : 8m : Les Bourbes, C⁵; chez Dinette, C⁷. *Argenton-La Châtre*, 1896-99, Fromental, C⁵ – 10m – ch. *Etampes-Pithiviers*, 1902-03, Passage inf. sur ch. val No 5, C¹ – 16m. *Lozanne-Givors*, 1903, Colombier, C² – 10m – (2 voûtes d'accès) MOV – ch. *Guéret-La Châtre*, 1901-05, 10m – ch : la Petite Creuse, C¹⁶ – 10m; la Creuse, C¹⁶ – 10m; Glâne, C¹² – MOV. *Bort-Neussargues*, 1903, Salsignac, C¹⁴ – 10m, MOV – ch. *Anduze-St-Jean-du-Gard*, 1905-09, 8m, MOV – ch.: St-Michel, C³; Vallat des Doucettes, C⁵; Vallat de Boisseson, C³. *Argent-Beaune-la-Rolande*, 1902-1903; la Vallée Parrin, C⁷ – 10m – MEV – ch. *Espalion-Bertholène*, 1904, Labaume, C⁶ – 14m MEV – ch. *Mateur-Nebeur, (Tunisie)*, 1908, Oued-Beja, C¹² – 21m. *Morez-St-Claude*, 1909-11, Valfin, C⁶ – 10m, MOV – ch. *Paris-Chartres*, la Remarde, C⁵ – 10m – MOV – ch. *Langogne-Le Puy*, 1905-1907, la Bargeasse, C⁶ – 10m, MOV – ch. *Moûtiers-Bourg-Saint-Maurice*, 1912, Les Plaines, C⁴ – 10m (arches d'accès), MOV – ch. *St-André-Puget-Théniers*, 1912 : La Beïte, C⁴ – 10m, ch. Le Gros-Vallon, C³ – 14m; Fontbouisse, C⁵ – 14m, MEV – ch.	Chalonnes, 1863-65, E¹⁷ – 30m. Nantes, *Nantes-La Roche-sur-Yon*, 1863-65, E⁹ – E⁷ – 30m. St-Pierre de Gaubert, sur la Garonne, *Agen-Tarbes*, 1868, E¹⁷ – 21m65, ch. Mauzac, sur la Dordogne, *Bergerac – Le Buisson*, 1877, E⁷ – 30m, cim. Verdon, 1905-06, E¹ – 40m, MEV – cim.		Freyssinet, 1890-91, A¹ – 45m, MEV – cim. Svenkerud, *Norvège*, 1905-07, A¹ – 44m, PT – cim. Pont sur le Vallat de Boisseson, *Anduze-St-Jean-du-Gard*, 1905-09, A¹ – 25m. MOV – ch. Krummenau, *Suisse*, 1910-1912, A¹ – 63m26, L – cim.	Sauveboeuf, sur la Vézère, *Nontron-Sarlat*, 1892-93, A³ – 24m, MOV – cim. Pont sur le Don, *Nantes-Châteaubriant*, 1875, A¹ – 17m.	Passage infr. de la Rte Nle No 12, *Morlaix-Carhaix*, 1893, A¹ – 19m70. Viaduc sur le Ster Laër, *Carhaix-Rosporden*, 1897, A – 8m. Viaduc sur l'Aulne, *Carhaix-Châteaulin*, 1909, C⁸ – 20m50. *Florac-Ste-Cécile-d'Andorge*, Viaducs de 12m : sur le ruisseau de Servières, C⁴. sur le Transgardon, C³. sur le Timbasses, C. sur la Mimente, C³. Pont sur la Gravona, 1884, A¹ – 43m53.

α	PONTS SOUS ROUTE					PONTS OU VIADUCS SOUS CHEMIN DE FER — VOIE NORMALE					VOIE ÉTROITE
	C	**E**	**Â**	**Â**	**Â**	**en 2 ann^x**	**C**	**E**	**Â**	**Â**	**Â**	
0.185		Carbonne, sur la Garonne, 1764-80, E^{3} – $31^{m}20$. Sault du Rhône, 1827, 34^{m}. Lanne, sur l'Adour, 1876, E^{7} – 24^{m}, MOV – cim. St-Jean, sur l'Adour, à Saubusse, 1880-82, E^{7} – 24^{m}, MOV – ch.			l'Archevêché, *Paris*, 1828, A^{3} – Arches de rive, 15^{m}.		Viaducs de : *Tours-Bordeaux*, 1846-48, la Manse, C^{15} – 15^{m}. *St-Denis-Creil*, 1856-58, Comelle, C^{15} – 19^{m}. *Arvant au Lot*, 1866-67, Neyrevèze, C^{3} – 15^{m}. *Limoges-Brive*, 1872-75, ch, 20^{m} : Vignols, C^{10}; La Sagne, C[illegible]; Le Sarget, C^{5}. *Limoges-Brive, par Uzerche*, 1885-90 : Limoges, C^{23} – 15^{m}. *Bourg-La Cluse*, 1872-75, Cize-Bolozon, sur l'Ain, C^{11} – 20^{m}. *La Flèche-Sablé*, 1875-77, la Sarthe, C^{11} – 20^{m}. *Rodez-Millau*, 1873-77, Aguessac, C^{14} – $11^{m}4$, MOV. *Eymoutiers-Meymac*, Les Farges, C^{11} – 15^{m} – ch. *St-Denis-Souillac*, 1880-84, ch: les Courtils, C^{7} – 15^{m}; Bramefond, C^{14} – 17^{m}. *Port-de-Piles-Preuilly*, 1882-83, Nambon, C^{5} – 20^{m}. *Poitiers-Le Blanc*, 1881-85, Le Blanc, C^{21} – 20^{m}, ch. *Montauban-Brive*, 1883-88, Lamothe, C^{15} – 15^{m}, ch. *Vendes-Mauriac*, 1888, Labiou, C^{10} – 9^{m}. *Argenteuil-Mantes*, 1888-90, Maurecourt, C^{3} – 11^{m}. *Issoudun-St-Florent*, 1889-93, St-Florent, C^{11} – 30^{m}, MOV – ch. *Tournemire-Le Vigan*, 1889-96, MEV: Rieusset, C^{6} – 13^{m}; Aumessas, C^{11} – 15^{m}. *Bourges-Cosne*, 1891-92, Les Moultonneaux, C^{3} – $8^{m}50$. *Carmaux-Rodez*, 1894-95, Auterne, C^{1} – 15^{m}; Moulines, arche centrale : 17^{m}, MEV – ch. *Nontron-Sarlat*, 1894-95, L'Enéa, C^{7} – 20^{m}, ch. *Argenton-La Châtre*, 1897-1901, L'Auzon, C^{10} – 20^{m}. *Espalion-Bertholène*, 1903-1904, MEV – ch, 11^{m}: les Conquettes, C^{12}; la Loubière, C^{7}. *Briey-Villerupt*, 1905, Brabant, C^{10} – 15^{m}. *St-Jean-d'Angély-Saujon*, 1905-1909, La Thonne, C^{7} – 11^{m}. *Miramas-L'Estaque*, 1911-12, La Corbière, C^{6} – $6^{m}50$, MOV – ch. *Paris-Chartres*, L'Eure, C^{1} – 20^{m}, C^{8} – $9^{m}50$, MOV – cim.	Orléans, *Orléans-Vierzon*, 1843-1846, E^{15} – $24^{m}20$. Port-de-Piles, *Tours-Poitiers*, 1846, E^{3} – 31^{m}. Barbentane, sur la Durance, 1847-49, E^{21} – 20^{m}. Port-Ste-Marie, *Condom-Port-Ste-Marie*, E^{9} – 32^{m}.	Lavaur, 1882-84, A^{1} – $61^{m}50$, MEV – cim. Rothweinbach, *Autriche*, 1904-06, A^{1} – 41^{m}, MOV – cim.	Pt biais sur le torrent de Caramagna, *Gênes-Asti*, *(Italie)*, 1890-91, A^{1} – $18^{m}10$. Condat, *Nontron-Sarlat*, 1893-95, A^{1} – $15^{m}15$, MOV – ch.		Viaducs : sur l'Isole, *Carhaix-Rosporden*, 1893, A – $21^{m}86$. sur l'Hyères, *Morlaix-Carhaix*, 1893, A – $22^{m}34$. *Guingamp-Paimpol*, 1896, du Trieux, E^{2} – 24^{m}. Passage inférieur, A^{1} – $12^{m}12$. Solis *(Suisse)*, *Albula*, 1901-02, C^{1} – 42, MOV – cim. sur l'Oust, *Loudéac-Carhaix*, 1904, A – 10^{m}. *Florac-Ste-Cécile d'Andorge*, sur le Transgardon, C – 20^{m}; sur le Timbasses, C – 20^{m}. de Triège *(Suisse)*, *Chatelard-Martigny*, A^{1} – $35^{m}40$.
0.19	St-Romain, sur la Vienne, 1857, C^{5} – 18^{m}. *Route de Saint Romain à Dangé.*	Waterloo, *Londres*, 1817, E^{9} – $36^{m}60$.		Pont sur la Meuse, en aval de Mézières, $14^{m}94$.	Fouchard, *Saumur*, 1774-82, A^{3} – 26^{m}. Iéna, *Paris*, 1807-14, A^{5} – 28^{m}.	Walnut-Lane, *Philadelphie, Etats-Unis*, 1906-08, A^{1} A^{1} – $70^{m}71$, B et grosses pierres – cim.	Viaducs de : *Nantes-Chateaulin*, 1860-62, Hennebont, C^{6} – 10^{m}, C^{5} – 22^{m}, ch. *Arvant au Lot*, 1866-67 : Elbarat, C^{9} – 10^{m}; Antérieux, C^{3} – 12^{m}; l'Aiguille, C^{1} – $14^{m}20$, C^{1} – 28^{m}. *Rodez-Millau*, 1873-77, Aguessac, C^{1} – $18^{m}50$, MEV. *Séverac-Marvejols*, 1877-79 : St-Laurent-d'Olt, C^{10} – 20^{m}; ch; le Piou, C^{6} – 20^{m}, MEV. *Marvejols-Neussargues*, 1879-82, 20^{m}, ch: Chanteperdrix, C^{9} – MEV; Merdarie, C^{2} – MOV. *Cahors-Brive*, 1881-89, Calamane, C^{28} – $9^{m}96$, MOV – ch. *Montauban-Brive*, 1882, Les Sept-Fonts, C^{13} – 10^{m}. *Tournemire-Le Vigan*, 1886-92, Les Cayrelets, C^{4} – $12^{m}50$, MOV. *Vendes-Mauriac*, 1888, 10^{m} : Jaleyrac, C^{7}; Chabrespine, C^{7}; Druilhes, C^{6}. *Argenteuil-Mantes*, 1888-90, ch: Gd Ravin de la Frette, C^{7} – 10^{m}; Pt Ravin de la Frette, C^{3} – 7^{m}. *Stanislau-Woronienka (Autriche)*, 1893-94, Worochta, C^{1} – $34^{m}60$, MOV – cim. *Mende-Séverac*, Tarnesque, C^{9} – 9^{m}, ch. *Bort-Neussargues*, 1903-05, Barajol, C^{12} – 20^{m}, MOV. *Paris-Chartres*, MOV – cim, $14^{m}15$: Oisème, C^{16}; l'Eure, C^{10}.	*Poitiers-Le Blanc*, 1881-84, 24^{m}: Chauvigny, E^{5}, St-Savin, E^{3}. Hocmard, *Nantes-Chateaubriant*, 1886, E^{3} – 30^{m} – cim. Mantes, *Argenteuil-Mantes*, 1888-89, E^{4} – 32^{m} et 34^{m}, ch. Mareuil, *Cahors-Brive*, 1891, E^{7} – 23^{m}.	*Gien–Argent*, 1887-92, Passages inférieurs : A^{1} – $27^{m}08$ et $25^{m}12$. Villefranche de Conflent, sur la Tet, *Prades-Olette*, 1889-91, A^{1} – $39^{m}35$.	Le Brézou, *Limoges-Brive*, 1887, A^{1} – $29^{m}20$, MOV – cim. sur la Chalouette, *Etampes-Pithiviers*, A^{1} – $23^{m}25$. Strandeelven, *Norvège*, 1902-04, A^{1} – 41^{m}, cim. Krenngraben, *Autriche*, 1904-05, A^{1} – 40^{m}. MOV - cim. Salcano, *Autriche*, 1904-06, A^{1} – 85^{m}. PT - cim. Langenbrand, *Bade*, 1907-09, A^{1} – 59^{m}. PT - cim. Grande-Roche, *Morez-St-Claude*, 1909-11, A^{7} – 10^{m}. MOV - ch. La Croix, *Frasne-Vallorbe*, 1912, E^{2} – 20^{m}, MOV - cim.		sur le canal de Nantes à Brest, *Carhaix-Rosporden*, 1892, A – 19^{m}. *Guingamp-Paimpol*, 1896, 7^{m}. P. $532^{k}421$, C. P. $532^{k}550$, C^{1}. *Florac-Ste-Cécile d'Andorge*, 25^{m}. Pont sur le Dourdon, C^{2}. Pont sur l'Andorge, C^{1}. *St-Méen-Loudéac*, 1904, 10^{m} Viaducs : sur le Daoulas, C^{5}; sur le Poulancre, C^{1}. *Bevers-Schuls (Suisse)*, 1910-12, A^{1}, MAV – cim : Cinuskel, $46^{m}97$. Tuoi, $47^{m}70$.

$$\text{Coefficient } \alpha = \frac{e_0 \text{ (épaisseur à la clef)}}{\left[1+\sqrt{2a \text{ (portée)}}\right] \mu \left(\text{fonction du surbaissement } \sigma\right)}$$

PONTS SOUS ROUTE						PONTS OU VIADUCS SOUS CHEMIN DE FER					
						VOIE NORMALE					VOIE ÉTROITE
C	E	Â	Â	Â	en 2 ann^x	C	E	Â	Â	Â	
Vieille-Brioude, 1824-31, $C^1 - 45^m$. St-Sauveur, 1860-61, $C^1 - 42^m$, MOV – cim. Avenue du Connecticut, *Washington*, 1899-1908, $C^8 - 45^m72$, B – cim.	Neuilly, 1768-74, $E^8 - 39^m$, PT. Frouard, sur la Moselle, 1788, 19^m50. Cé, 1846-48, $E^{11} - 25^m$. Mantes, 1873-75, $E^3 - 40^m$, 36^m50. Came, sur la Bidouze, 35^m.	Abbaretz, *Nantes-Chateaubriant*, 1875, $A^1 - 22^m$, B – cim.	Vérone, *Italie*, 1354, $A^3 - 48^m73$. Bains de Lucques, *Italie*, 1845-77, $A^1 - 47^m85$, Br – ch.			Viaducs de : *Montluçon-Limoges*, 1862-64, 10^m : Crevant, C^{10}; Villatte, C^{10}; Lavaud-Franche, C^9. *Tournemire-Le Vigan*, 1886-92 : Ste-Eulalie, $C^8 - 15^m$, MEV; Lapanouse, $C^{11} - 15^m$, MEV; le Bassin, $C^7 - 17^m$. *Limoges-Brive*, 1887-91, St-Germain-les-Belles, $C^{11} - 17^m$, ch. *Largnac-Vendes*, 1888, Bassignac, $C^{10} - 11^m$. *Argenteuil-Mantes*, 1888-90, La Montciant, $C^3 - 11^m50$, ch. *Guérel-La Châtre*, 1902-04, Vauvre, $C^5 - 8^m$, ch. *St-Jean-d'Angély-Saujon*, 1906-07, Chaumet, $C^3 - 13^m$.	Bouchemaine, *Tours-Nantes*, 1846, $E^5 - 24^m$. Plessis-lez-Tours, *Tours-Vendôme*, 1855-56, $E^{15} - 24^m$. sur l'Anglin, à Ingrandes, *Poitiers-Le Blanc*, 1885-87, $E^3 - 24^m$.	Schalchgraben, *Autriche*, 1904-05, $A^1 - 52^m$, PT – cim.	Blossac, à Poitiers, $A^3 - 14^m$. Pt de la Cèze, 16^m20. Schwändeholzdobel, *Bade*, 1899-1900, $A^1 - 57^m$, PT – cim. Steyrling, *Autriche*, 1904-05, $A^1 - 70^m$, PT – cim.		Viaducs : sur le Trieux, *Guingamp-Paimpol*, 1896, $C^1 - 12^m80$.
Dinan, sur la Rance, 1846-52, $C^{10} - 16^m$.	Poissy, 1848-71-74, $E^{16} - 14^m92$.			Pontoise, 1772, 29^m26. Corneille, *Rouen*, 1810-35, A^6 – Arches de rive : 26^m.		*Eymoutiers-Meymac*, Légaud, $C^5 - 12^m$, ch. *Montauban-Brive*, 1881-83, Malminot, $C^{15} - 9^m$. *Mauriac, à la ligne d'Aurillac à St-Denis*, 1882, Les Agats, $C^9 - 12^m$. *Aurillac-St-Denis*, 1884-85, L'Authre, $C^5 - 16^m$. *Limoges-Brive*, 1887-91, Vigen, C^{10}-16^m, MOV – ch. *Gênes-Asti, (Italie)*, 1890-93, 18^m50, Br – ch. : sur les Torrents Chiaravagna, C^{10}; Cantalupo, C^6; de Varenna, C^9; Acquasanta, C^{11}. *Tournemire-Le Vigan*, 1890-95, 18^m, ch : Cailaret, C^9 – MEV; Valcrose, C^7 – MOV. *Carmaux-Rodez*, 1894-97, la Gascarie, $C^{12} - 20^m$, MEV – ch. *Lozanne-Givors*, 1903, 12^m, MOV – ch. : Crévy, C^3; la Chicotière, C^7; les Planches, C^7; les Armières, C^8; l'Iseron, C^{13}. *Anduze-St-Jean du Gard*, 1905-09, MOV – ch. : Mialet, $C^{10} - 12^m$; la Plaine, sur le Gardon, $C^7 - 12^m$; Vallat d'Amous, $C^6 - 11^m$. *Morez-St-Claude*, 1909-11, le Saillard, C^1 : arches d'accès, 12^m, MOV – ch. *Miramas-l'Estaque*, 1912-14 : Les Eaux-Salées, $C^1 - 50^m$, MEV – cim.	Montlouis, *Blois-Tours*, 1843-46, $E^{12} - 24^m75$. Cinq-Mars, *Tours-Nantes*, 1846, $E^{19} - 20^m$.	Palmgraben, *Autriche*, 1904-05, $A^1 - 49^m$, MOV – cim. Leymarie, *Nontron-Sarlat*, 1893, $A^1 - 19^m45$, MOV – cim.	Jamna, *Autriche*, 1893-94, $A^1 - 48^m$, MAV – cim.	–	*Carhaix-Rosporden*, 1893-97, ch : sur le Kerminot, $C - 12^m$; sur le Troujoly, $C - 4^m$; sur le Stergoff, $C - 4^m$; Pt : 28^k250, $C^3 - 12^m$. *Lons-le-Saulnier-Saint-Claude*, 1899. Revigny, $C^5 - 12^m$. *Carhaix-Chateaulin*, 1907, $C^1 - 12^m$.
	Compiègne, 1733, $E^3 - 23^m40$. Poissy, 1848-71-74, $E^{16} - 17^m32$.	St-Étienne, *Autriche*, 1842-46, $A^1 - 43^m60$, MOV.		Ste-Maxence, 1774-85, $A^3 - 23^m40$. Pesmes, sur l'Oignon, 1772, $A^1 - 13^m64$.		*Paris-Mulhouse*, 1855-56, Nogent-sur-Marne : Arches d'accès, C^{30}, 15^m. *Rennes-Brest*, 1863-65 : Morlaix, $C^{14} - 15^m50$; le Guédic, $C^7 - 15^m$; le Gouët, $C^{12} - 15^m$. *Arvant au Lot*, 1866-67, 15^m : Lège, C^3; le Passadou, C^3. *Cahors-Brive*, 1882-88, 15^m, ch : le Boulet, C^{26}, MEV; Souillac, C^{30}, MOV. *Rome-Viterbe, (Italie)*, 1892-93, Vallée de Ronciglione, $C^7 - 18^m$. *Lozanne-Givors*, 1903 : Civrieux, $C^3 - 15^m$. *Langogne-Le Puy*, 1905-07, Arquejols, $C^{11} - 15^m$, MOV – ch. *Anduze-St-Jean du Gard*, 1905-09, 15^m, MOV – ch. : Le Mas du Pont, C^3; la Salindrique, C^1. *Miramas-L'Estaque*, 1911-13, 15^m, MOV – ch. : Le Jonquier (4 v^{tes} d'accès); l'Etable (2 v^{tes} d'accès); Le Grand-Vallat, C^8; Mauvallon, C^6; Les Loubatons, C^7; Les Riaux, C^8; Mejean, C^5; L'Aigle, C^4.	sur la Cère, 1884-85, *Aurillac-St-Denis*, 35^m.	Céret, 1883-85, $A^1 - 45^m$, L – cim.	Gutach, *Bade*, 1899-1900, $A^1 - 64^m$, PT – cim. Gour-Noir, *Limoges-Brive*, 1888-89, $A^1 - 60^m$, MEV – cim.		*Carhaix-Rosporden*, 1897, sur le Goaranvec, $C^1 - 7^m$. *Carhaix-Chateaulin*, 1909, sur l'Aulne, $C^1 - 6^m$.
Albi, sur le Tarn, $C^8 - 27^m60$.	Fium'Alto, *Corse*, 1862-63, $E^1 - 40^m$, MOV – ch. Annibal, *Italie*, 1868-70, $E^1 - 55^m$, Br et MOV ch – cim. Diable, *Italie*, 1871-72, $E^1 - 55^m$, Br. et MOV ch – cim.	Bordeaux, 1822, $A^{17} - 20^m85$ et 26^m49.				*Arvant au Lot*, 1866-67, La Gouyère, $C^3 - 10^m$. *Limoges-Brive*, 1873-75 : Pompadour, $C^8 - 25^m$, ch; Pt de la Corrèze, $C^3 - 14^m$. *Anduze-St-Jean du Gard*, 1905-09, MOV – ch. : St-Michel, $C^1 - 18^m$; Vallat d'Amous, $C^1 - 18^m$. *Nérac-Mont-de-Marsan*, Pt sur le Luddon, $C^1 - 22^m$.	Signac, *Montréjeau-Luchon*, 1871-72, $E^1 - 40^m$, PT, MOV cim, ch.				

Coefficient $\alpha = \dfrac{e_0 \text{ (épaisseur à la clef)}}{\left[1 + \sqrt{2a \text{ (portée)}}\right] \mu \left(\text{fonction du surbaissement } \sigma\right)}$

α	PONTS SOUS ROUTE C	PONTS SOUS ROUTE E	PONTS SOUS ROUTE Â	Â	Â	en 2 ann^x	PONTS OU VIADUCS SOUS CHEMIN DE FER — VOIE NORMALE C	VOIE NORMALE E	VOIE NORMALE Â	VOIE NORMALE Â	VOIE NORMALE Â	VOIE ÉTROITE
0.215							Viaducs de : *Marvejols-Neussargues*, 1879-83, Crucize, C^{11} – 25^m MEV – ch. *Quéroy-Nontron*, 1882-83, Le Bandiat, C^3. Arche centrale : 20^m50. *Vendes-Mauriac*, 1888 ; Méallet, C^1 – 15^m. *Lozanne-Givors*, 1903, Le Colombier, Arche centrale, 30^m, MOV – ch. *Briey-Villerupt*, 1906, Le Thil, C^3 – 25^m, MOV. *Morez-St-Claude*, 1909-11, Le Pain de Sucre, grande arche, 15^m, MOV – ch.	Viaduc sur le Vallat de Daudé, *Anduze-St-Jean-du-Gard*, 1905-09, E^1 – 22^m. MOV – ch.		Chambeuil, 1866, 23^m22. Jaremcze, *Autriche*, 1893-94, A^1 – 65^m, PT – cim.		
0.22		Saumur, 1756-64, E^{12} – 19^m50. Tours, 1765-77, E^{15} – 24^m36.					*Arvant au Lot*, 3 C^1 de 20^m aux P^ts 65^k3, 65^k436, 65^k5. *Lozanne-Givors*, 1903, Arche centrale, 20^m ; les Armières, l'Iseron, MOV – ch. *Morez-St-Claude*, 1909-11 : Morez, C^9 – 20^m MEV – ch. *Miramas-L'Estaque*, 1911-12, 20^m, MOV – ch. : Les Aragnols, C^3 ; la Corbière, C^7.		Berdoulet, *Ariège*, 1860-61, A^1 – 40^m, MOV – cim Wäldlitobel, *Autriche*, 1883-84, A^1 – 41^m, MOV – ch. cim.			
0.225	Ornaisons, 1745-52, C^1 – 42^m90.						*Paris-Mulhouse*, 1855-56, Nogent-sur-Marne, Grandes arches : C^4 – 50^m, MOV – cim.	Longueville-lez-Metz, 1854, E^8 – 20^m60.		Maretta, Prarolo, *Italie*, 1851-52, A^1 – 40^m, Br. Liège, 1867, 10^m.		
0.23			Nydeck, *Suisse*, 1840-44, A^1 – 45^m90, MEV – ch, cim.				*La Clayette-Lamure*, Le Sornin, 1898-1900, C^1 – 35^m, MOV – ch.					
0.235							*La Clayette-Lamure*, 1892-95, Mussy, C^{18} – 25^m, MOV – ch. *Morez-St-Claude*, 1909-11, Saillard, Arche centrale 25^m, MOV – ch. *Miramas-L'Estaque*, 1911-12, *L'Etable*, Arche centrale : 25^m, MOV – ch.					
0.24							*Bussière-Galant-St-Yrieix*, 1902, Pont sur l'Isle, C^1 – 20^m, MOV – ch. *Miramas-L'Estaque*, 1911-12, Le Jonquier, Arche centrale : 30^m, MOV – ch. *Moûtiers-Bourg-St-Maurice*, 1912, Les Plaines, Arche centrale : 30^m, MOV – ch					
0.245			Tournon, 1351-1583, A^1 – 49^m20. Crespano, *Italie*, 1832-36, A^1 – 40^m, Br.									
0.25												
0.255												
0.26	Collonges, 1869-73, C^1 – 40^m, PT, MOV – ch.											
0.265		Gignac, 1776-1810, E^1 – 48^m73, PT.										
0.27												
0.275												
0.28												
0.285		Vizille, 1751-66, E^1 – 41^m08, PT – ch.										
......												
0.35		Lavaur (Vieux P^t), 1773-91, E^1 – 48^m72, PT – ch.										

PONTS DÉCRITS DANS LE TOME III

INDEX ALPHABÉTIQUE

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME III

1RE PARTIE. — VOÛTES INARTICULÉES *(Suite)*

LIVRE I. - DESCRIPTION DES PONTS QUI ONT OU AVAIENT DES VOÛTES INARTICULÉES DE 40m ET PLUS DE PORTÉE. TABLEAUX SYNOPTIQUES. — MONOGRAPHIES.

(Suite)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ Â

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE Â¹ rte (⩾ 40m)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\widehat{\widehat{A}}$

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\widehat{\widehat{A}}^1$ r^{te} ($\geqslant$ 40m) *(Suite)*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\widehat{A}$

(*Suite*)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\widehat{\mathbf{A}}^1$ r^te^ (⩾ 40m) (*Suite*)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\hat{A}$

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\hat{A}^1$ r^{te} ($\geqslant 40^m$) *(Suite)*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ Â

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE Â¹ rte (⩾ 40m) *(Suite)*

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CONDUITE D'EAU (AQUEDUCS)

SÉRIE Â¹ aq (⩾ 40m)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\hat{\hat{A}}$

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\hat{\hat{A}}^1$ Fʳ (⩾ 40ᵐ)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\hat{\hat{A}}$

(Suite)

PONT A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\hat{\hat{A}}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$) *(Suite)*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\hat{\hat{A}}$

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\hat{\hat{A}}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$) *(Suite)*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ Â

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE Â¹ Fʳ (⩾ 40ᵐ)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\hat{\overset{\frown}{A}}$

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\overset{\frown}{A}^1$ F^r ($\geqslant 40^m$) *(Suite)*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\widehat{A}$

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\widehat{A}^1$ Fr (⩾ 40m) *(Suite)*

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\widehat{A}^n$ rte (⩾ 40m)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC ASSEZ SURBAISSÉ $\hat{A}$

(Suite)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE $\hat{A}^n$ Fr ($\geqslant$ 40m)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ $\hat{A}$

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE $\hat{A}^1$ rte ($\geqslant$ 40m)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ Â

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS ROUTE

SÉRIE Â¹ r^te (⩾ 40^m) *(Suite)*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ A

(Suite)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CONDUITE D'EAU (AQUEDUCS)

SÉRIE A¹ aq (⩾ 40m)

PONTS A UNE SEULE GRANDE ARCHE SOUS CHEMIN DE FER A VOIE NORMALE

SÉRIE A¹ Fr (⩾ 40m)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE An rte (⩾ 40m)

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ $\overset{\frown}{\mathbf{A}}$

(Suite)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE $\overset{\frown}{\mathbf{A}}{}^{n}\,\mathrm{r}^{te}\,(\geqslant 40^{m})$ *(Suite)*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ Â

(Suite)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE Â^n r^{te} ($\geqslant$ 40^m) *(Suite)*

VOÛTES INARTICULÉES EN ARC TRÈS SURBAISSÉ Â

(Suite)

PONTS A PLUSIEURS GRANDES ARCHES SOUS ROUTE

SÉRIE Âⁿ rte (⩾ 40m) *(Suite)*

QUELQUES VOÛTES INARTICULÉES
QU'ON AURAIT, A TORT, CHERCHÉES AU LIVRE I

TITRE I. — VOÛTES INARTICULÉES ⩾ 40m EN BÉTON PEU ARMÉ

QUELQUES VOÛTES INARTICULÉES

QU'ON AURAIT, A TORT, CHERCHÉES AU LIVRE I

(Suite)

TITRE II. — VOÛTES INARTICULÉES ⩾ 40m TOMBÉES PENDANT QU'ON LES CONSTRUISAIT

TITRE III. — VOÛTES INARTICULÉES AUXQUELLES ON A ATTRIBUÉ A TORT 40m DE PORTÉE OU PLUS

LIVRE II. — CE QUE L'EXPÉRIENCE ENSEIGNE DE SPÉCIAL AUX VOÛTES INARTICULÉES

TITRE I. — COMMENT ON TRACE UNE VOÛTE

TITRE I. — COMMENT ON TRACE UNE VOÛTE *(Suite)*

CHAPITRE III. — ÉPAISSEUR D'UNE VOÛTE

CHAPITRE IV — BANDEAUX

TITRE II. — COMMENT ON CALCULE LES EFFORTS DANS LES GRANDES VOÛTES HYPOTHÈSE ÉLASTIQUE

CHAPITRE I. — COMMENT ON DÉTERMINE, POUR UNE SECTION QUELCONQUE, L'EFFORT NORMAL ET LE COUPLE DE FLEXION

CHAPITRE II. — ON CONNAIT L'EFFORT TOTAL N SUR UNE SECTION, SA DISTANCE *u* AU CENTRE DE GRAVITÉ. COMMENT N SE DISTRIBUE-T-IL SUR LA SECTION ? EFFORTS PAR UNITÉ EN CHAQUE POINT.

TITRE III. — RELATION ENTRE LES CHARGES ET LA FORME DE LA VOÛTE

CHAPITRE I. — ON DOIT TRACER LA FIBRE MOYENNE DE FAÇON QUE LES COURBES DE PRESSION S'EN ÉCARTENT LE MOINS POSSIBLE

CHAPITRE II. — CAS D'UNE VOÛTE INFINIMENT MINCE

RELATION ENTRE :

D'UNE PART, LA FORME D'UNE VOÛTE INFINIMENT MINCE, INCOMPRESSIBLE, DONT CHAQUE ÉLÉMENT S'ORIENTE SUIVANT LA RÉSULTANTE DES FORCES QUI LUI SONT APPLIQUÉES, C-A-D UNE COURBE FUNICULAIRE DES CHARGES ;

D'AUTRE PART, UNE LIGNE LIMITANT LES CHARGES VERTICALES COMPTÉES A PARTIR DE LA VOÛTE, DITE LIGNE DE CHARGE.

CHAPITRE III. — VOÛTE D'ÉPAISSEUR FINIE SOUMISE A DES CHARGES OU SURCHARGES CONTINUES.

RECHERCHE PAR LE CALCUL DE LA FORME A LUI DONNER POUR QUE LE TRAVAIL MAXIMUM Y DÉPASSE PEU LE TRAVAIL MOYEN, C-A-D POUR QUE LES COURBES DE PRESSION S'ÉCARTENT PEU DE LA FIBRE MOYENNE.

RELATION ENTRE LES CHARGES ET LA FORME DE LA VOÛTE *(Suite)*

CHAPITRE IV. — UN ARC EST DIT ÉLASTIQUE QUAND LES DÉFORMATIONS Y SONT PROPORTIONNELLES AUX EFFORTS (Hypothèse de Hooke), ET QU'UNE SECTION PLANE RESTE PLANE APRÈS FLEXION (Hypothèse de Navier).

DANS QUELLES LIMITES EST-CE VRAI POUR LES VOÛTES, ET A-T-ON LE DROIT DE LES CALCULER COMME ÉLASTIQUES ?

ANNEXE

ÉPAISSEUR A LA CLEF DES VOÛTES INARTICULÉES

ERRATA

DU TOME III

Page 124, 1re ligne :

au lieu de : **Tlinthe,** lire **Plinthe.**

Voir aussi l'**Errata général,** à la fin du Tome V.